МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра электромеханики

В.П. ЕРУНОВ

РАСЧЕТ ЯКОРЯ КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОМУ ЗАДАНИЮ
ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2009

пустая страница

УДК 621.313.2(07)
ББК 31.261.67 я 7
Е 79

Рецензент
доктор технических наук, заведующий кафедрой электромеханики
Н.Г. Никиян

Ерунов, В.П.

Е 79 **Расчет якоря коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности: методические указания к расчетно-графическому заданию / В.П. Ерунов – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. – 83 с.**

Методические указания предназначены для выполнения расчетно-графического задания по разделу «Машины постоянного тока» курса «Электрические машины».

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по программе высшего профессионального образования по специальности 140601 – Электромеханика.

Е $\frac{2202070100}{6Л9 - 02}$ ББК 31.261. 67 я 7

Содержание

Введение

Электродвигатели постоянного тока широко применяются в различных отраслях промышленности. Их значительное распространение объясняется преимуществом характеристик: высокий пусковой и перегрузочный момент, высокое быстродействие, широкий диапазон плавного регулирования частоты вращения.

Двигатели постоянного тока мощностью от десятка до сотен ватт имеют широкое применение в электроприводах гибких производственных систем, промышленных роботов, систем автоматики и транспортных средств.

По способу возбуждения двигатели постоянного тока (ДПТ) делятся на двигатели с электромагнитным возбуждением и с магнитоэлектрическим возбуждением (с возбуждением от постоянных магнитов). Двигатели с возбуждением от постоянных магнитов наиболее перспективны вследствие малой их инерционности. К преимуществам этих двигателей следует также отнести высокий КПД, стабильность магнитного потока возбуждения при изменении температуры окружающей среды, высокую надежность и технологичность конструкции индуктора. Необходимое регулирование частоты вращения якоря двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов осуществляется изменением напряжения питания, при этом поток возбуждения остается постоянным при различных частотах вращения, что создает благоприятные условия для коммутации и устойчивой работы.

Увеличение быстродействия коллекторных двигателей малой мощности ограничивается допустимыми электромагнитными нагрузками, моментом инерции и перегрузочной способностью, определяемой условием коммутации, насыщением зубцовой зоны якоря. Для достижения предельного быстродействия у двигателей необходимо уменьшать момент инерции и увеличивать магнитный поток в воздушном зазоре, что увеличивает магнитодвижущую силу возбуждения, габариты и массу статора, поэтому получение высоких динамических и удельных электромеханических параметров в одном типе двигателя практически невозможно. В связи с этим проведена дифференциация технических требований к ДПТ малой мощности в зависимости от их функциональных назначений, имеющих следующую классификацию [1];

– силовые двигатели, предназначенные для продолжительного режима работы, для которых основными параметрами являются максимальный КПД и ресурс при лимитированных массе и объеме;
– силовые двигатели, предназначенные для кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы, для которых основными параметрами являются минимальная масса на единицу полезной мощности, лимитируемые предельно допустимой температурой обмоток двигателя;
– управляемые двигатели, основными параметрами которых являются минимальные электромеханическая и электромагнитная постоянные времени при лимитированных массе и объеме.

В зависимости от функционального назначения двигателя, условий, в которых он должен работать, требований к его эксплуатационным характеристикам и конструктивному исполнению, проектирование его имеет некоторые особенности.

В методических указаниях приведена методика аналитического расчета якоря двигателей постоянного тока малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов для первых двух функциональных классов мощностью до 800 Вт, с напряжением 12 – 110 В, с частотой вращения 1000 – 6000 об/мин.

В методике используются основные базовые понятия, зависимости и рекомендации, приведенные в литературе [2].

1 Расчет якоря коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности

1.1 Исходные данные расчетно-графического задания

Рассчитать якорь двигателя постоянного тока малой мощности со следующими данными.

Номинальная мощность двигателя $P_{ном}$. Номинальное напряжение $U_{ном}$. Номинальная частота вращения $n_{ном}$. Возбуждение независимое (от постоянных высококоэрцитивных магнитов). Режим работы (S1, S2, S3). Класс нагревостойкости изоляции (B, F). Исполнение по степени защиты IP 44, по способу охлаждения IC 0040.

За основу конструкции якоря принимается зубцовый якорь.

1.2 Определение основных размеров двигателя постоянного тока

Основными размерами двигателя постоянного тока принято называть диаметр якоря D и расчетную длину якоря l_δ. Эти размеры, а также число полюсов 2р, определяют остальные размеры и вес двигателя. Для определения основных размеров необходимо определить по номинальным данным двигателя электромагнитную мощность $P_{эм}$, выбрать электромагнитные нагрузки: токовую линейную нагрузку A и индукцию в воздушном зазоре B_δ; выбрать коэффициенты α_δ и λ, характеризующие относительную геометрию двигателя. Выбор электромагнитных нагрузок и относительной геометрии проводится на основании анализа технического задания на проектирование двигателя и свойств материалов, выбранных для использования в двигателе.

Выбор индукции в воздушном зазоре B_δ предопределяет значение индукции в зубцах и ярме якоря и, в значительной мере, размеры магнитной цепи статора. Кроме того, величина B_δ определяет эксплуатационные характеристики, инерционность и перегрузочную способность двигателя. Увеличение индукции в воздушном зазоре B_δ приводит к уменьшению числа проводов обмотки якоря, уменьшению сопротивления обмотки якоря и улучшению коммутации вследствие уменьшения реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря. Уменьшение сопротивления якоря приводит к уменьшению электрических потерь и повышению «жесткости» механической характеристики двигателя.

В ДПТ с возбуждением от постоянных магнитов величина индукции в воздушном зазоре B_δ ограничивается магнитными характеристиками применяемых постоянных магнитов при использовании конструкции индуктора без концентрации магнитного потока, а также ограничивается насыщением магнитной системы двигателя и в первую очередь сердечника якоря, размеры которого с увеличением индукции B_δ уменьшаются, а магнитный поток увеличивается. Увеличение насыщения магнитной цепи приводит к увеличению требуемой для намагничивания магнитной цепи двигателя магнитной энергии маг-

нитов, что приводит к увеличению объема постоянных магнитов и, соответственно, к увеличению стоимости электродвигателя.

В магнитных системах ДПТ малой мощности с малой длиной магнитов и существенными размагничивающими полями якоря необходимо применять высококоэрцитивные постоянные магниты, полученные из магнитотвердых материалов на основе ферритобариевых сплавов, интерметаллического соединения кобальта с редкоземельными элементами и сплавов «Неомакс».

Промышленностью в больших объемах выпускаются феррит-бариевые магниты, которые имеют самую низкую стоимость единицы магнитной энергии. Формирование структурной анизотропии при изготовлении этих магнитов существенно повысило их свойства: $(B\cdot H)_{max}$ до 32 кДж/м^3 при $H_{cв}$ = 240 кА/м по сравнению с $(B\cdot H)_{max}$ = 6 кДж/м^3 и $H_{cв}$ = 125 кА/м у изотропных феррит-бариевых магнитов. Магниты изготавливают методом порошковой металлургии с применением как одноосного прессования в магнитном поле, так и объемного гидростатического обжатия с последующей термообработкой при температуре 1160 – 1200 ^{o}С, в результате которой образуется одноосная магнитная анизотропия. Основным недостатком феррит-бариевых магнитов является большая температурная нестабильность, обусловленная низкой температурой Кюри (450 ^{o}С). Характеристики изотропных и анизотропных феррит-бариевых магнитов приведены в литературе [3] и в приложении Ж данного пособия.

Магнитотвердые материалы на основе интерметаллического соединения кобальта с редкоземельными элементами имеют коэрцитивную силу по индукции на порядок выше литых кобальтовых с кристаллической анизотропией, так для $SmCo_5$ $H_{cв}$ = 800 кА/м при B_r = 0,8 – 0,9 Тл, при этом максимальная энергия $(BH)_{max}$ = 150 – 160 кДж/м^3. Редкоземельные постоянные магниты имеют высокую стоимость и высокую температурную стабильность ($T_к$ = 750 ^{o}С). Магнитные характеристики редкоземельных постоянных магнитов типа КС37, КСП37 приведены в литературе [3] и в приложении Ж данного пособия.

Перспективным магнитотвердым материалом, с точки зрения применения в магнитных системах электрических машин малой мощности, является сплав «Неомакс», который представляет собой новый материал в виде сплава железо-неодим-бор с тетрагональной решеткой, обладающий высокой константой кристаллографической анизотропии, не содержащий остродефициных материалов (самария и кобальта) и имеющий магнитную энергию в 1,5 раза большую, чем соединение $SmCo_5$, и в шесть раз дешевле него. Технология изготовления этих магнитов достаточно проста: изготовление сплава – размол – сухое прессование в магнитном поле – спекание и термообработка. При этом достигнуты следующие магнитные параметры: B_r > 1,2 Тл, $H_{cв}$ >900 кА/м, $(BH)_{max}$ до 360 кДж/м^3. «Неомакс» имеет механическую прочность в два раза большую (1250 Мпа), чем сплав $SmCo_5$. Основной недостаток этого магнита – температурная нестабильность, она в четыре раза хуже, чем у $SmCo_5$.

С учетом вышеизложенного, индукцию в воздушном зазоре B_δ выбирают равной индукции магнита B_d в оптимальной рабочей точке кривой размагничивания предварительно выбранной марки магнита, для высококоэрцитивных магнитов диапазон выбора индукции B_δ лежит в пределах 0,1 – 0,8 Тл.

Величина токовой линейной нагрузки А существенным образом влияет на все характеристики двигателя. На выбор токовой линейной нагрузки оказывает влияние режим работы двигателя (S1, S2, S3), мощность двигателя и условия охлаждения. Только при совокупном учете этих факторов осуществляют выбор значения токовой линейной нагрузки.

Выбор бóльших значений токовой линейной нагрузки А приводит к уменьшению основных размеров двигателя, увеличению сопротивления обмотки якоря. Последнее приводит к снижению «жесткости» механической характеристики двигателя. Кроме того, увеличение сопротивления обмотки якоря ведет к увеличению удельных потерь с единицы поверхности якоря и, соответственно, приводит к повышению температуры нагрева обмотки якоря. Увеличение токовой линейной нагрузки А приводит к ухудшению коммутации за счет роста реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря. Ухудшение коммутации приводит к искрению под щетками, увеличивается нагрев щеток, падение напряжения на щетках, увеличивается коэффициент трения щеток о коллектор, что в свою очередь приводит к повышенному износу щеток, увеличению потерь на коллекторе и увеличению нагрева коллектора.

Увеличение токовой линейной нагрузки сопровождается увеличением влияния поперечной реакции якоря на поле возбуждения и искажением его. Искажение поля приводит к неравномерному распределению электрического потенциала на коллекторе. Кроме того, искажение поля приводит к увеличению индукции в зубцах якоря под набегающим краем полюса, в соответствии с чем увеличиваются потери в стали зубцов. С увеличением токовой линейной нагрузки растет размагничивающее действие поперечной реакции якоря, что увеличивает требуемую для намагничивания магнитной цепи двигателя величину магнитной энергии постоянных магнитов и приводит к увеличению их размеров.

С увеличением токовой линейной нагрузки возрастает число проводников в обмотке якоря N и витков в секции ω_c, что приводит к увеличению коэффициента заполнения паза $k_з$ и вызывает затруднения в размещении обмотки с большим числом проводников в пазе при малом диаметре якоря.

Поэтому целесообразно выбирать меньшее значение токовой линейной нагрузки А, которая компенсируется выбором бóльшей плотности тока в обмотке якоря, что обеспечивает требуемый тепловой режим двигателя.

Коэффициент полюсного перекрытия α_δ характеризует относительную ширину дуги магнита, так как полюсные наконечники в магнитных системах с высококоэрцитивными магнитами, как правило, не применяются, и определяет расстояние между краями полюсов (магнитов). Выбор бóльшего значения коэффициента полюсного перекрытия α_δ приводит к уменьшению размера якоря за счет увеличения магнитного потока и уменьшения числа проводов обмотки якоря. Последнее приводит к уменьшению сопротивления обмотки якоря и, соответственно, к уменьшению электрических потерь и снижению нагрева машины. Увеличение α_δ приводит к сближению полюсов и увеличению потока рассеяния, а также приводит к увеличению индукции в зоне коммутации от поля поперечной реакции якоря и увеличению ЭДС в короткозамкнутой секции об-

мотки якоря, что приводит к ухудшению коммутации. Увеличение длины полюсной дуги приводит к увеличению размагничивающего действия реакции якоря на основное поле двигателя, что приводит к необходимости увеличения намагничивающей силы постоянных магнитов.

Величина α_δ выбирается бóльшей для двухполюсных конструкций двигателя.

Относительная длина якоря λ оказывает заметное влияние на весовые и эксплуатационные характеристики двигателя. Выбор бóльшего значения λ приводит к уменьшению диаметра якоря и увеличению длины якоря, к увеличению значения реактивной ЭДС в коммутируемой секции обмотки якоря и ухудшению условий коммутации, а также к ухудшению условий охлаждения двигателя и увеличению прогиба вала. Последнее требует увеличения воздушного зазора. Для каждой машины существует свое оптимальное значение λ, при котором характеристики двигателя наилучшим образом соответствуют техническому заданию.

Выбор числа полюсов $2p$ не оказывает влияние на объем якоря, зато влияет на весовые и эксплуатационные характеристики двигателя. При увеличении числа полюсов $2p$ уменьшается полюсное деление τ, уменьшается магнитный поток полюса и возрастают потоки рассеяния. Увеличение числа полюсов увеличивает число постоянных магнитов, щеток и щеткодержателей, что усложняет конструкцию и увеличивает стоимость двигателя. В двигателях с петлевой обмоткой увеличение числа полюсов приводит к увеличению проводников обмотки якоря.

Уменьшение полюсного деления τ приводит к уменьшению вылета лобовых частей обмотки якоря и уменьшению средней длины витка обмотки якоря. Это ведет к уменьшению расхода обмоточной меди, уменьшению сопротивления обмотки якоря, соответственно и электрических потерь в ней, и уменьшению температуры нагрева обмотки якоря. Кроме того, уменьшение полюсного деления приводит к уменьшению напряженности поперечного поля якоря, что приводит к уменьшению размагничивающего действия поперечной реакции якоря.

1.2.1 Ток якоря при нагрузке машины

Ток якоря в двигателе с независимым возбуждением (постоянными магнитами) одновременно является током двигателя

$$I_a = I = \frac{P_{ном}}{\eta \cdot U_{ном}},$$

где η – предварительное значение КПД электродвигателя, его значения выбирают из диапазона от 0,6 до 0,75.

1.2.2 Электромагнитная мощность машины

$$P_{эм} = \frac{1+3\eta}{4 \cdot \eta} \cdot P_{ном}.$$

1.2.3 Диаметр якоря

$$D = \sqrt[3]{\frac{6{,}1 \cdot P_{эм}}{\alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A' \cdot n_{ном} \cdot \lambda}},$$

где α_δ – коэффициент полюсного перекрытия, его значение выбирают из диапазона от 0,6 до 0,75;

$B_\delta = B_d$ – магнитная индукция в воздушном зазоре, принимается равной индукции магнита в оптимальной рабочей точке кривой размагничивания предварительно выбранной марки магнита (для феррит бариевых магнитов выбирают из диапазона 0,1 – 0,24 Тл, для редкоземельных магнитов из диапазона 0,3 – 0,7 Тл);

A' – предварительное значение токовой линейной нагрузки, её значение выбирают из диапазона $(40 - 120) \cdot 10^2$ А/м при продолжительном режиме работы (S1) и в диапазоне $(70 - 200) \cdot 10^2$ А/м при кратковременном (S2) и повторно- кратковременном (S3) режимах работы двигателя (бóльшие значения соответствуют бóльшей мощности);

λ – отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру, это значение выбирают из диапазона от 0,5 до 1,8.

Полученное значение диаметра якоря округляют до тысячных долей метра и выбирают ближайшее стандартное его значение по приложению VIII [2] или по приложению А данного пособия.

1.2.4 Расчетная длина якоря

$$l_\delta = \lambda \cdot D.$$

1.2.5 Окружная скорость вращения якоря

$$V_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{ном}}{60}.$$

1.2.6 Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p},$$

принимают $2p = 2$ при $P_{ном} \le 100$ Вт;

$2p = 4$ при $P_{ном} > 100$ Вт.

1.2.7 Расчетная ширина полюсного наконечника (магнита)

$$b_\delta = \alpha_\delta \cdot \tau.$$

1.2.8 Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2 = \frac{p \cdot n_{ном}}{60}.$$

1.3 Обмотка якоря

Обмотка якоря двигателя постоянного тока является замкнутой. Конструктивно обмотка якоря выполняется барабанной и двухслойной. Двухслойная обмотка обеспечивает большой выбор укорочения шага обмотки и дает меньший вылет лобовых частей. Обмотка якоря состоит из секций. Секцией обмотки называется часть обмотки, заключенная между двумя смежными по обходу коллекторными пластинами. Каждая секция состоит из одного или нескольких последовательно соединенных витков. Число секций и витков определяются мощностью машины, напряжением, частотой вращения и условиями работы.

Проводники обмотки якоря укладывают в пазы якоря. В зависимости от параметров двигателя в каждом пазу размещается одна или несколько секций. В одном пазу может быть число секций, равное отношению числа коллекторных пластин k к числу пазов якоря z. Число секций, приходящихся на один паз, является важным параметром обмотки якоря, определяющим коммутационные, конструктивные и технологические свойства обмотки.

В ДПТ малой мощности применяются в основном простые петлевые и волновые обмотки якоря, поэтому здесь приводится расчет только простых петлевых и волновых обмоток.

Порядок соединения секций в обмотку определяется шагом обмотки. Шаги обмотки могут выражаться в секционных сторонах, пазах и в зубцовых делениях. Наиболее распространенным является выражение шагов в пазах. Порядок подсоединения секций к коллектору определяется коллекторным шагом. На рисунках 1.1 и 1.2 приведены схемы соединения секций простой петлевой обмотки и простой волновой обмотки.

Расстояние между сторонами одной и той же секции называется первым частичным шагом обмотки y_1. Первый частичный шаг y_1 характеризует ширину

секции. Для того чтобы ЭДС сторон секций суммировались, необходимо, чтобы стороны секций находились под разноименными полюсами. Расстояние между концом одной секции и началом следующей называют вторым частичным шагом y_2 обмотки. Расстояние между двумя смежными секциями называют результирующим шагом y. Расстояние между двумя коллекторными пластинами, к которым присоединены начало и конец секции, называют коллекторным шагом $y_к$. Обмоточные шаги y_1, y_2, y и коллекторный шаг $y_к$ должны быть целыми числами.

Петлевая и волновая обмотки различаются способом соединения секционных сторон со стороны коллектора и числом параллельных ветвей a: простая петлевая обмотка имеет $2a$ $2p$, а простая волновая обмотка $2a$ 2.

Применение укорочения в петлевых обмотках приводит к уменьшению длины и вылета лобовых частей обмотки, уменьшению сопротивления и веса обмотки якоря. Поэтому чаще применяют петлевую обмотку с укорочением шага, то есть хордовую обмотку. В простых волновых обмотках укорочение шага никакого выигрыша не дает, так как на сколько уменьшается первый частичный шаг, на столько увеличивается второй частичный шаг обмотки. В зависимости от расположения концов смежных секций обмотки могут быть неперекрещивающиеся и перекрещивающиеся. Неперекрещивающаяся обмотка имеет меньший вылет со стороны коллектора, поэтому будет иметь меньшее сопротивление и вес обмотки якоря.

Для получения неперекрещивающейся простой петлевой обмотки необходимо выбирать $y_2 < y_1$, а для получения неперекрещивающейся простой волновой обмотки необходимо в выражении для определения результирующего шага y брать единицу со знаком минус. Шаг по пазам $y_п$ берут в виде целого числа, так как в этом случае получают более технологичную равносекционную обмотку. Для того чтобы обмотку считать равносекционной, необходимо, чтобы одинаковой была и геометрическая ширина всех секций, тогда левые и правые стороны всех секций будут укладываться одинаковым образом в одинаково отстоящие пазы – если левая сторона некоторой секции занимает крайнее левое положение в верхнем слое, то и ее правая сторона занимает крайнее левое положение в нижнем слое.

Волновая обмотка имеет меньшее число витков в секции при одном и том же числе коллекторных пластин, что уменьшает значение реактивной ЭДС в коммутируемой секции и улучшает коммутацию.

Меньшее число проводников волновой обмотки, но бóльшего сечения, приводит к упрощению технологии изготовления обмотки. Простая волновая обмотка имеет только две параллельные ветви, поэтому при волновой обмотке можно в двигателе устанавливать всего два щеточных узла, то есть щетки устанавливают только под двумя смежными полюсами при любом числе полюсов. Для уменьшения длины коллектора и разгрузки щеток в двигателе можно устанавливать число щеточных узлов, равное числу полюсов.

В двухполюсных двигателях и волновая и петлевая обмотки имеют одно и то же число параллельных ветвей, поэтому по электрическим характеристикам они одинаковы. Имеются только технологические отличия: в петлевой об-

мотке лобовые части со стороны коллектора и со стороны выходного конца вала лежат по одну сторону от плоскости витка, а в волновой обмотке – по разные стороны.

Поэтому в ДПТ малой мощности при двухполюсной исполнении магнитной системы целесообразно применять простую петлевую обмотку, при четырехполюсном исполнении – простую волновую обмотку якоря.

1.3.1 Предварительное общее число эффективных проводников обмотки якоря

$$N' = \frac{\pi \cdot D \cdot A' \cdot 2a}{I},$$

где $2a$ – число параллельных ветвей обмотки якоря: для простой петлевой обмотки $2a = 2p$, для простой волновой обмотки $2a = 2$.

1.3.2 Число пазов якоря

$$z = (3-4) \cdot D \cdot 100.$$

Выбирают целое нечетное число пазов якоря.

1.3.3 Число коллекторных пластин

$$k = (1-3) \cdot z,$$

принимают $k = 2 \cdot z$ при $2p = 2$,
$k = z$ или $k = 3 \cdot z$ при $2p = 4$.

1.3.4 Предварительное число витков в секции обмотки якоря

$$\omega'_c = \frac{N'}{2 \cdot k}.$$

Полученное значение числа витков в секции ω'_c округляют до целого числа витков в секции обмотки якоря ω_c.

1.3.5 Уточненное число проводников обмотки якоря

$$N = \omega_c \cdot 2 \cdot k.$$

1.3.6 Число проводников обмотки якоря в пазу якоря

$$N_n = \frac{N}{z}.$$

1.3.7 Уточненное значение токовой линейной нагрузки

$$A = \frac{N \cdot I}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D},$$

при этом должно выполняться условие

$$\left| \frac{A' - A}{A'} \right| \le 0{,}1.$$

1.3.8 Шаги обмотки якоря

а) Для простой петлевой обмотки якоря:

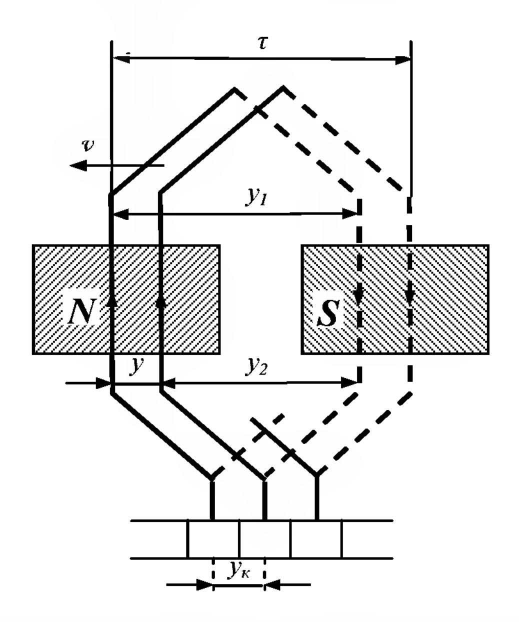


Рисунок 1.1 – Схема соединения секций петлевой обмотки

первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{k}{2p} - \varepsilon_k,$$

результирующий шаг и шаг по коллектору

$$y = 1;\ y_k = 1,$$

второй частичный шаг

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - 1.$$

б) Для простой волновой обмотки:

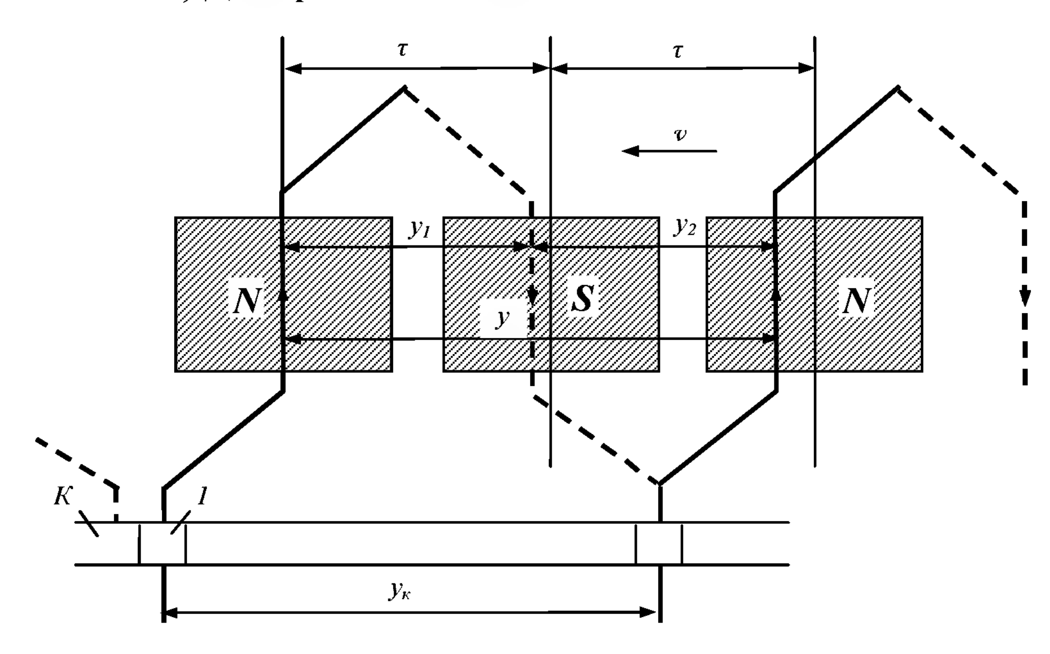


Рисунок 1.2 – Схема соединений секций волновой обмотки

первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{k}{2p} - \varepsilon_k,$$

результирующий шаг и шаг по коллектору

$$y = y_k = \frac{k \pm 1}{p},$$

второй частичный шаг

$$y_2 = y - y_1.$$

Шаг петлевой и волновой обмоток по пазам

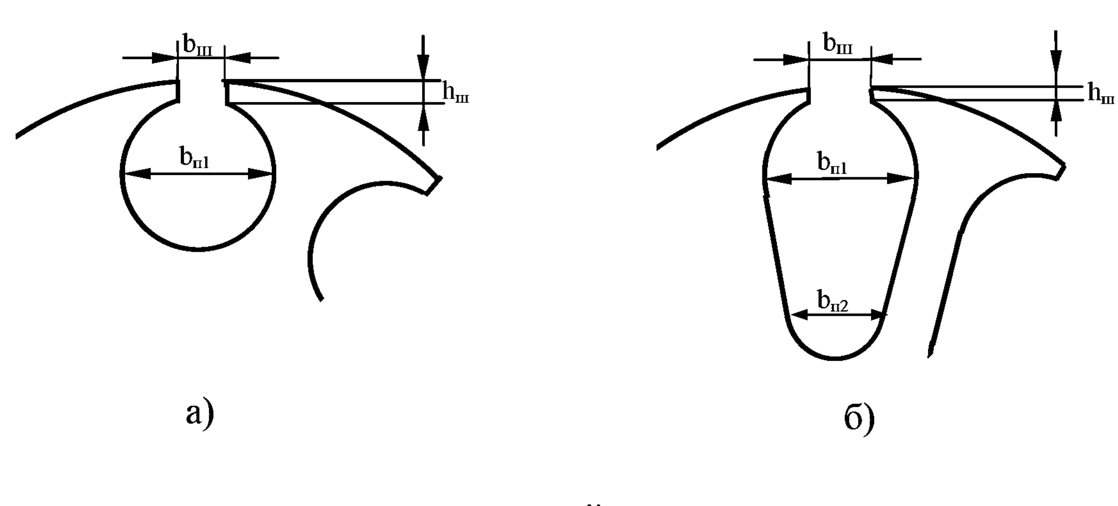
$$y_n = \frac{z}{2p} - \varepsilon.$$

Обмоточные шаги y_1, y_2, y, y_k, y_n должны быть целыми числами. Укорочение шага ε_k и ε $(\varepsilon_k > 0; \varepsilon > 0)$ выбирают такими, чтобы шаги обмоток были целыми числами. Применение укорочения шага $(\varepsilon_k > 0)$ в петлевых обмотках приводит к уменьшению длины и вылета лобовых частей, к уменьшению со-

противления и массы обмотки якоря. В волновых обмотках укорочение шага выигрыша не дает, так как на сколько уменьшается первый шаг (y_1), на столько же увеличивается второй частичный шаг (y_2).

1.4 Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря

В двигателях малой мощности применяют полузакрытые пазы якоря круглой или овальной формы, формы пазов приведены на рисунке 1.3



а – круглый паз;
б – овальный паз

Рисунок 1.3 – Пазы якоря

Обмотку якоря электродвигателя постоянного тока малой мощности выполняют из круглого медного обмоточного провода с эмалевой изоляцией класса нагревостойкости "B" и "F" (марку провода выбирают из приложения Б) и укладывают в изолированные пазы якоря. Способы изоляции пазов приведены в приложении Е.

1.4.1 Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря выбирают из диапазона $(2{,}5 - 10)\cdot 10^6$ А/м^2 при продолжительном режиме работы S1 и из диапазона $(5 - 20)\cdot 10^6$ А/м^2 при кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы S2, S3. Бóльшие значения плотности тока соответствуют бóльшим мощностям электродвигателя.

1.4.2 Сечение и диаметр провода обмотки якоря

Предварительное значение сечения провода обмотки якоря

$$g' = \frac{I}{2a \cdot j'}.$$

Окончательное значение сечения g и диаметров провода (диаметр неизолированного провода d и диаметр изолированного провода $d_{из}$) выбирают из приложения Б, таблица Б.2 или из приложения 3 [4].

1.4.3 Окончательная плотность тока в проводнике обмотки якоря

$$j = \frac{I}{2a \cdot g}.$$

1.4.4 Бóльший диаметр овального и диаметр круглого паза якоря [5, 6]

$$b_{n1} = \frac{k_c \cdot B_z \cdot z \cdot D' \cdot Sin\frac{\alpha'}{2} - \pi \cdot D \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_z \cdot z \cdot \left(1 + Sin\frac{\alpha'}{2}\right)},$$

где k_c – коэффициент заполнения пакета сталью, его значение выбирают по таблице 2.1 [7] или по таблице В.1 данного пособия для выбранной марки стали сердечника якоря и способа изолировки листов;

$\alpha' = \frac{2\pi}{z}$ – центральный угол на один паз;

$D' = D - 2 \cdot h_ш$;

$h_ш = 0{,}5$ мм – высота шлица паза якоря;

B_z – магнитная индукция в зубце, выбирают из диапазона (0,5–1,9)Тл.

1.4.5 Меньший диаметр овального паза принимается равным

$$b_{n2} \geq 0{,}002 \text{ м},$$

при этом необходимо, чтобы $b_{n2} < b_{n1}$.

1.4.6 Периметр паза

а) овального паза

$$П_n = b_{n1}\left(\frac{\pi + \alpha'}{2} + ctg\frac{\alpha'}{2}\right) - \frac{b_{n2}\left(1 - Sin\frac{\alpha'}{2}\right)}{Sin\frac{\alpha'}{2}};$$

б) круглого паза

$$П_п = \pi \cdot b_{п1}.$$

1.4.7 Высота паза якоря рассчитывается, исходя из условия обеспечения параллельности стенок зубца

а) овального паза

$$h_п = b_{п1}\frac{\left(1+Sin\frac{\alpha'}{2}\right)}{2\cdot Sin\frac{\alpha'}{2}} - \frac{b_{п2}\left(1-Sin\frac{\alpha'}{2}\right)}{2\cdot Sin\frac{\alpha'}{2}} + h_ш;$$

б) круглого паза

$$h_п = b_{п1} + h_ш.$$

1.4.8 Площадь паза якоря

а) овального паза

$$S_п = \left[\frac{(b_{п1})^2}{4}\cdot\left(\frac{\pi+\alpha'}{2} + ctg\frac{\alpha'}{2}\right) - \frac{(b_{п2})^2}{4\cdot tg\frac{\alpha'}{2}}\right]\cdot k_{ск},$$

где $k_{ск} = \frac{l_\delta}{\sqrt{t_z^2 + l_\delta^2}}$ – при скосе пазов якоря на одно зубцовое деление;

$t_z = \frac{\pi \cdot D}{z}$ – зубцовое деление.

б) круглого паза

$$S_п = \pi \cdot \frac{b_{п1}^2}{4}\cdot k_{ск}.$$

Если на якоре скос пазов не выполняют, то принимают $k_{ск} = 1$.

1.4.9 Площадь поперечного сечения паза, заполненного обмоткой

$$S_{по} = S_п - S_{из} - S_{кл},$$

где $S_{из} = b_{из} \cdot П_п$ – площадь сечения пазовой изоляции;

$b_{из}$ – толщина пазовой изоляции, выбирается из приложения Е;

$S_{кл} = b_{кл} \cdot h_{кл}$ – площадь сечения пазового клина;

$b_{кл} = (0{,}5 - 0{,}6) \cdot b_{п1}$ – ширина клина;

$h_{кл} = (0{,}5 - 1{,}5) \cdot 10^{-3}$ м – высота клина.

1.4.10 Коэффициент заполнения паза изолированными проводниками

$$k_з = \frac{N_п \cdot d_{из}^2}{S_{по}}.$$

Для автоматизированной укладки обмотки в пазы якоря необходимо, чтобы $0{,}68 \le k_з \le 0{,}72$.

При ручной укладке обмотки якоря допускается получение коэффициента заполнения паза в диапазоне $0{,}75 \ge k_з > 0{,}72$.

1.4.11 Ширина зубца якоря

$$b_z = \frac{B_\delta \cdot t_z}{k_c \cdot B_z},$$

необходимо, чтобы выполнялось условие $b_z \ge 0{,}002$ м.

1.4.12 Средняя длина полувитка секции обмотки якоря

а) если якорь выполнен без скоса пазов

$$l_{a\,ср} = l_\delta + l_{пл} + \frac{y_п}{z} \cdot \pi(D - h_п),$$

где $l_{пл} = (2 - 3) \cdot 10^{-3}$ м – прямолинейный отрезок лобовой части обмотки;

б) если якорь выполнен со скосом пазов

$$l_{a\,ср} = \frac{l_\delta}{k_{ск}} + l_{пл} + \frac{y_п}{z} \cdot \pi \cdot (D - h_п).$$

1.4.13 Сопротивление обмотки якоря при расчетной рабочей температуре

$$R_a = k_\Theta \cdot R_{a\,20},$$

где $k_{\Theta} = 1 + 0{,}004 \cdot \vartheta$;

ϑ – расчетная температура.

Согласно ГОСТ 183-74 для обмоток, соответствующих классу нагревостойкости В, расчетная температура принимается равной 75 °С, для обмоток, соответствующих классам нагревостойкости F и H, расчетная температура принимается равной 115 °С. Температура окружающей среды при эксплуатации двигателя принимается равной 20 °С.

$R_{a\,20} = \dfrac{N \cdot l_{a\,cp}}{57(2a)^2 \cdot g} \cdot 10^{-6}$ – сопротивление обмотки якоря при температуре 20 °С.

1.5 Коллектор и щетки

В электродвигателях постоянного тока малой мощности, как правило, применяют коллектор на пластмассе. Коллекторные пластины коллектора изготовляют из твердотянутой меди и изолируют их друг от друга и от вала якоря пластмассой. Конструкция коллектора представлена на рисунке 1.4. Конструкция щеткодержателя должна обеспечить правильное положение щеток на коллекторе (рисунок 1.5). Щетка должна выступать из втулки щеткодержателя на 1-2 мм.

В низковольтных электродвигателях преимущественно применяют медно-графитовые щетки, в высоковольтных находят применение и другие сорта щеток, например электрографитированные.

Предварительное значение наружного диаметра коллектора

$$D'_к = (0{,}65 - 0{,}8) \cdot D.$$

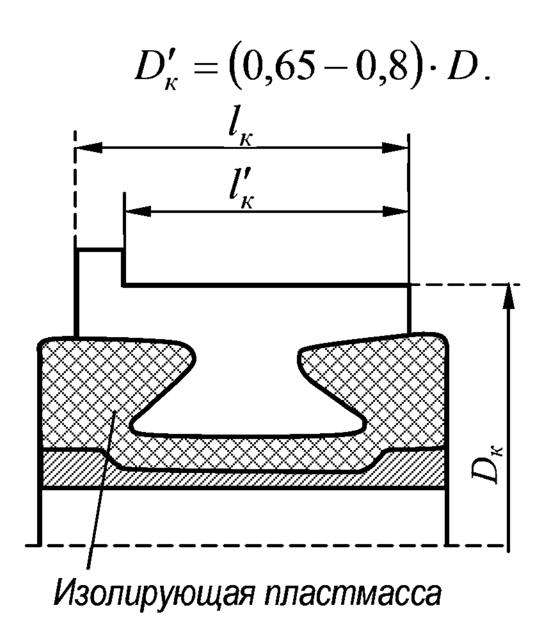
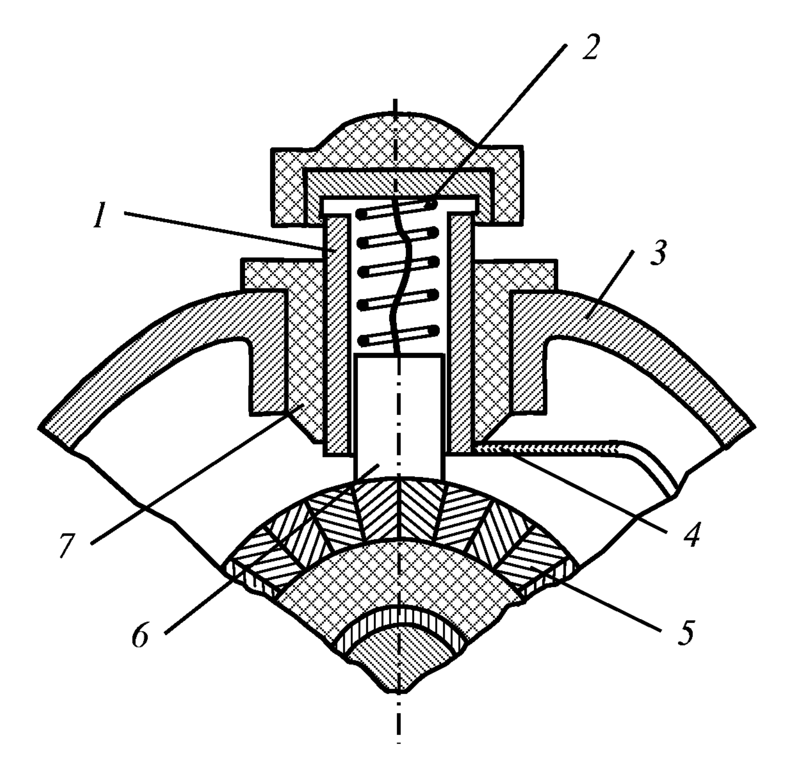


Рисунок 1.4 – Коллектор малых машин с втулкой из пластмассы



1 – металлическая втулка; 2 – пружина; 3 – подшипниковый щит;
4 – зажим; 5 – коллектор; 6 – щетка; 7 – изолирующая втулка;

Рисунок 1.5 – Щеткодержатель малых машин трубчатый

1.5.1 Относительное коллекторное деление

а) для простой волновой обмотки

1) если y – четное число

$$t_к^* < \frac{0{,}8 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_\delta)}{\left(\gamma + \frac{k}{z} - \frac{1}{2p}\right) \cdot 2p},$$

где $\gamma = 2 - 4$ – число перекрываемых щеткой коллекторных пластин;

2) если y – нечетное число

$$t_к^* < \frac{0{,}8 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_\delta)}{\left(\gamma + \frac{k}{z} - \frac{1-p}{2p}\right) \cdot 2p}.$$

б) для простой петлевой обмотки

$$t_к^* < \frac{0{,}8 \cdot \pi \cdot (1-\alpha_\delta)}{\left(\frac{2 \cdot k}{z} - 0{,}5\right) \cdot 2p}.$$

Выбирают значение относительного коллекторного деления $t_к^*$.

1.5.2 Коллекторное деление

$$t_к = t_к^* \cdot D_к' .$$

1.5.3 Ширина коллекторной пластины

$$\beta_к = t_к - \beta_и ,$$

где $\beta_и = (0{,}4 - 0{,}6) \cdot 10^{-3}$ м при $U_{ном} \le 30$ В,

$\beta_и = (0{,}6 - 0{,}8) \cdot 10^{-3}$ м при $U_{ном} > 30$ В.

По технологическим требованиям необходимо, чтобы $\beta_к \ge 1{,}5$ мм.

1.5.4 Окончательный диаметр коллектора

$$D_к = \frac{k(\beta_и + \beta_к)}{\pi}.$$

1.5.5 Окружная скорость коллектора

$$V_к = \frac{\pi \cdot D_к \cdot n_{ном}}{60}.$$

1.5.6 Площадь поперечного сечения щетки

Выбирают марку щетки и плотность тока $j_{щд}$ по таблице П 4.2 [4] или по таблице Д.1 приложения Д.

$$S_щ = \frac{I}{p \cdot j_{щд}} ,$$

где $j_{щд}$ – допустимая плотность тока для выбранной марки щетки.

1.5.7 Размеры щетки

а) предварительная ширина щетки

$$b_щ' = (1{,}3 - 2{,}0) \cdot t_к ,$$

б) предварительная длина щетки по оси коллектора

$$a'_{щ} = \frac{S_{щ}}{b'_{щ}}.$$

По таблице П 4.1 [4] или по таблице Д.2 приложения Д выбирают стандартные значения $b_{щ}$, $a_{щ}$ и $h_{щ}$.

в) высота щетки определяется из условия

$$h_{щ} = (1{,}5 - 2{,}0) \cdot a_{щ}.$$

1.5.8 Окончательная плотность тока под щетками

$$j_{щ} = \frac{I}{p \cdot a_{щ} \cdot b_{щ}}.$$

1.5.9 Длина коллектора

а) активная длина коллектора по оси вала

$$l'_{к} = (1{,}5 - 2{,}0) \cdot a_{щ};$$

б) полная длина коллектора по оси вала

$$l_{к} = l'_{к} + (3 - 5) \cdot d.$$

1.5.10 Проверка величины электродвижущей силы обмотки якоря

$$E = U_{ном} - I \cdot R_{a} - \Delta U_{щ},$$

где $\Delta U_{щ} = \Delta U_{щп} \cdot \frac{j_{щ}}{j_{щд}}$ – падение напряжения на щетках;

$\Delta U_{щп}$ – переходное падение напряжения на пару щеток при плотности тока $j_{щд}$, берется из таблицы Д.1 приложения Д.

При этом должно выполняться условие:

$$\left| \frac{E - E'}{E} \right| \le 0{,}03,$$

где $E' = \dfrac{p \cdot N \cdot \Phi_\delta \cdot n_{ном}}{a \cdot 60}$,

$\Phi_\delta = B_\delta \cdot l_\delta \cdot b_\delta$ – магнитный поток в воздушном зазоре под одним полюсом.

1.6 Проверка коммутации

Так как в электродвигателе постоянного тока малой мощности добавочные полюсы не устанавливают, а щетки на коллекторе обычно располагают на геометрической нейтрали, то процесс коммутации тока в короткозамкнутой секции обмотки якоря получается замедленным из-за наличия в них реактивной ЭДС e_p и ЭДС поля якоря e_a. Эти ЭДС суммируются и вызывают в цепи короткозамкнутой секции добавочный ток, увеличивающий плотность тока на сбегающем крае щетки. В момент размыкания коммутируемой секции между краем щетки и сбегающей коллекторной пластиной возникает искрение. Интенсивность этого искрения зависит от величины результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции. Во избежание недопустимого искрения под щетками величина результирующей ЭДС в секции не должна превышать определенного значения. Коммутация тока в секции может также ухудшиться вследствие влияния поля полюсов, если ширина коммутационной зоны будет близка по значению к расстоянию между краями наконечников двух соседних полюсов.

1.6.1 Ширина коммутационной зоны

$$b_{зк} = b_{щ} \cdot \frac{D}{D_к} + t_к \left(\frac{k}{z} + \left| \frac{k}{2p} - y_1 \right| - \frac{a}{p} \right) \cdot \frac{D}{D_к} .$$

Для благоприятной коммутации необходимо соблюдать соотношение

$$b_{зк} < 0{,}8(\tau - b_\delta) .$$

1.6.2 Среднее значение реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции якоря

$$e_p = 2 \cdot \omega_c \cdot \lambda_п \cdot l_\delta \cdot A \cdot V_a ,$$

где $\lambda_п = \left[0{,}6 \dfrac{2 \cdot h_п}{b_{п1} + b_{п2}} + \dfrac{l_л}{l_\delta} + 0{,}92 \lg\left(\dfrac{\pi \cdot t_z}{b_ш} \right) \right] \cdot 10^{-6}$ – магнитная проводимость пазового рассеяния для овального паза ;

$$\lambda_n = \left[0{,}6\frac{h_n}{b_{n1}} + \frac{l_л}{l_\delta} + 0{,}92\lg\left(\frac{\pi \cdot t_z}{b_ш}\right)\right] \cdot 10^{-6}$$ – магнитная проводимость пазового рассеяния для круглого паза ;

$l_л = l_{a\,ср} - l_\delta$;

$b_ш = (2-8) \cdot d_{из}$.

Ширина шлица $b_ш$ паза определяет эксплуатационные и технологические характеристики двигателя. Чем больше ширина шлица $b_ш$, тем проще изготовление обмотки якоря, тем меньше магнитная проводимость пазового рассеяния и лучше коммутация, меньше индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря. Но увеличение ширины шлица $b_ш$ увеличивает МДС воздушного зазора, что требует увеличения магнитной энергии постоянных магнитов.

Поэтому ширина шлица $b_ш$ выбирается минимально возможной по условию укладки обмотки в пазы. При автоматизированной укладке обмотки в пазы берется бóльшее значение, при ручной укладке нужно брать меньшее значение ширины шлица.

При выборе ширины шлица $b_ш$ необходимо соблюдать условие $b_ш < b_{кл}$.

1.6.3 Среднее значение ЭДС поля якоря

$$e_a = \frac{0{,}8 \cdot \pi \cdot \omega_c \cdot A \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot V_a}{\tau - b_\delta} \cdot 10^{-6} \ .$$

1.6.4 Среднее значение результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря

$$e = e_p + e_a \ .$$

Для благоприятной коммутации необходимо, чтобы значение результирующей ЭДС в секции обмотки якоря удовлетворяло условию:

$$e \le e_{max},$$

где e_{max} для соответствующего $U_{ном}$ определяется из графика e_{max} $f(U_{ном})$.

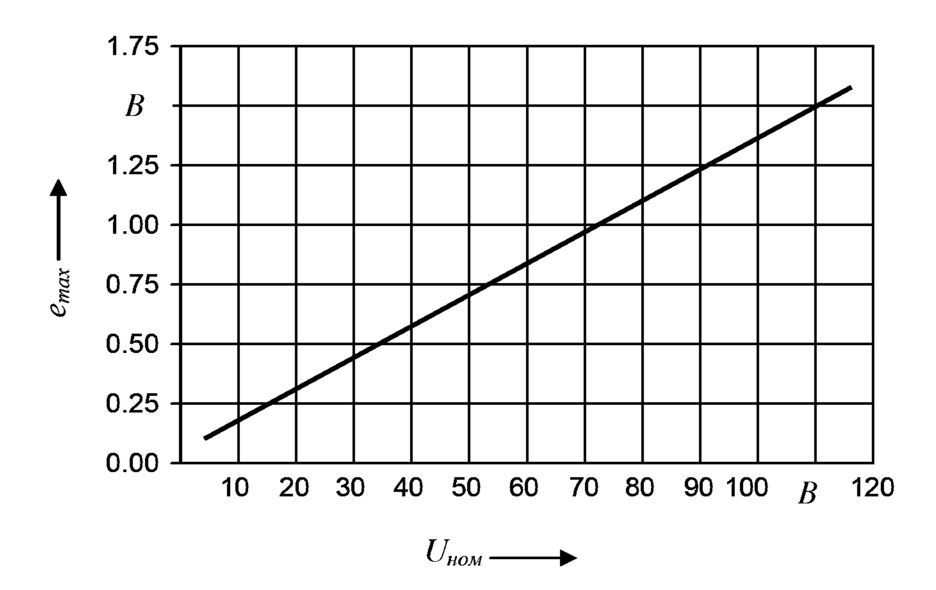


Рисунок 1.6 – Зависимость $e_{\max} = f(U_{ном})$

Контрольные вопросы

1 Что относится к основным размерам ДПТ и на какие эксплуатационные характеристики двигателя они влияют?
2 Что необходимо учитывать при выборе индукции в воздушном зазоре и токовой линейной нагрузки?
3 Какие типы обмоток применяют для якорных обмоток ДПТ малой мощности и их отличительные особенности?
4 Что учитывают при выборе марки провода?
5 Какие формы паза якоря целесообразно выбирать для двигателей малой мощности?
6 С учетом чего выбирают материал для сердечника якоря?
7 Для чего выполняют скос пазов на якоре?
8 Если коэффициент заполнения паза якоря изолированными проводами больше рекомендуемого значения, что необходимо предпринять, чтобы его уменьшить?
9 Если коэффициент заполнения паза якоря изолированными проводами меньше рекомендуемого значения, что необходимо предпринять, чтобы его значение увеличить?
10 Как влияет величина сопротивления обмотки якоря на механическую характеристику ДПТ?
11 Если толщина зубца меньше рекомендуемого значения, то что необходимо предпринять, чтобы ее увеличить?
12 С учетом чего выбирают марку щетки?
13 Что надо учитывать при выборе ширины шлица паза якоря?
14 Если в результате расчета получено, что коммутация неблагоприятная, то что необходимо предпринять, чтобы это устранить?

2 Пример расчета якоря коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности

2.1 Исходные данные расчетно-графического задания

Рассчитать якорь двигателя постоянного тока малой мощности со следующими данными.

Полезная мощность $P_{ном} = 70$ Вт. Номинальное напряжение сети $U_{ном} = 110$ В. Номинальная частота вращения вала $n_{ном} = 5500$ об/мин. Возбуждение от постоянных магнитов типа феррит бария. Исполнение по степени защиты IP 44, по способу охлаждения IC 0040 – с естественным охлаждением без внешнего вентилятора. Режим работы – кратковременный S2–20. Изоляция класса нагревостойкости B.

2.2 Основные размеры двигателя

За основу конструкции электродвигателя принимаем конструкцию, приведенную в приложении К.

2.2.1 Ток якоря при нагрузке машины

$$I_a = I = \frac{P_{ном}}{\eta \cdot U_{ном}} = \frac{70}{0{,}646 \cdot 110} = 0{,}985 \text{ А},$$

где значение КПД принимаем равным 64,6%, т.е. η = 0,646.

2.2.2 Электромагнитная мощность двигателя

$$P_{эм} = \frac{1 + 3 \cdot \eta}{4 \cdot \eta} \cdot P_{ном} = \frac{1 + 3 \cdot 0{,}646}{4 \cdot 0{,}646} \cdot 70 = 79{,}59 \text{ Вт}.$$

2.2.3 Диаметр якоря

$$D = \sqrt[3]{\frac{6{,}1 \cdot P_{эм}}{\alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A' \cdot n_{ном} \cdot \lambda}} = \sqrt[3]{\frac{6{,}1 \cdot 79{,}59}{0{,}7 \cdot 0{,}24 \cdot 6{,}5 \cdot 10^3 \cdot 5500 \cdot 1{,}6}} = 0{,}038 \text{ м},$$

где $\alpha_\delta = 0{,}7$;

$B_\delta = 0{,}24$ Тл;

$A' = 6{,}5 \cdot 10^3 \ \frac{\text{А}}{\text{м}}$;

$\lambda = 1{,}6$.

По приложению А из стандартного ряда размеров выбираем диаметр якоря $D = 0{,}038$ м.

2.2.4 Расчетная длина якоря

$$l_\delta = \lambda \cdot D = 1{,}6 \cdot 0{,}038 = 0{,}061 \text{ м}.$$

2.2.5 Окружная скорость вращения якоря

$$V_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{ном}}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}038 \cdot 5500}{60} = 10{,}94 \ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2.2.6 Полюсное деление
Выбираем двухполюсную конструкцию двигателя, 2p = 2

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0{,}038}{2} = 0{,}06 \text{ м}.$$

2.2.7 Расчетная ширина полюса (ширина магнита)
Выбираем конструкцию полюса без полюсного наконечника

$$b_\delta = b_м = \alpha_\delta \cdot \tau = 0{,}7 \cdot 0{,}06 = 0{,}042 \text{ м}.$$

2.2.8 Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2 = \frac{p \cdot n_{ном}}{60} = \frac{1 \cdot 5500}{60} = 91{,}67 \text{ Гц}.$$

2.3 Обмотка якоря

Для двухполюсной конструкции двигателя выбираем петлевую обмотку с числом параллельных ветвей $2a = 2p$.

2.3.1 Предварительное общее число эффективных проводников обмотки якоря

$$N' = \frac{\pi \cdot D \cdot A' \cdot 2 \cdot a}{I} = \frac{\pi \cdot 0{,}038 \cdot 6{,}5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 1}{0{,}985} = 1574{,}38,$$

принимаем $N' = 1575$.

2.3.2 Число пазов якоря

$$z = (3-4)\cdot D \cdot 100 = (3-4)\cdot 0{,}038 \cdot 100 = 11{,}4 - 15{,}2,$$

принимаем $z = 15$.

2.3.3 Число коллекторных пластин

$$k = 2 \cdot z = 2 \cdot 15 = 30.$$

2.3.4 Предварительное число витков в секции обмотки якоря

$$\omega'_c = \frac{N'}{2 \cdot k} = \frac{1575}{2 \cdot 30} = 26{,}3 \ ,$$

принимаем число витков в секции обмотки якоря равным округленному значению, то есть $\omega_c = 26$.

2.3.5 Уточненное число проводников обмотки якоря

$$N = \omega_c \cdot 2 \cdot k = 26 \cdot 2 \cdot 30 = 1560.$$

2.3.6 Число проводников обмотки якоря в пазу якоря

$$N_n = \frac{N}{z} = \frac{1560}{15} = 104.$$

2.3.7 Уточненное значение токовой линейной нагрузки

$$A = \frac{N \cdot I}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D} = \frac{1560 \cdot 0{,}985}{2 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0{,}038} = 6439 \ \frac{\text{А}}{\text{м}} \ ,$$

при этом должно выполняться условие

$$\left|\frac{A' - A}{A'}\right| \le 0{,}1 \qquad\qquad \left|\frac{6500 - 6439}{6500}\right| = 0{,}009.$$

Условие выполняется.

2.3.8 Шаги обмотки якоря

Выбираем простую петлевую обмотку

а) первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{k}{2p} - \varepsilon_k = \frac{30}{2} - 0 = 15,$$

где $\varepsilon_k = 0$;

б) результирующий шаг

$$y = 1 \ ;$$

в) шаг по коллектору

$$y_k = 1 \ ;$$

г) второй частичный шаг

$$y_2 = y_1 - y = 15 - 1 = 14;$$

д) шаг обмотки по пазам

$$y_n = \frac{z}{2p} - \varepsilon = \frac{15}{2} - 0{,}5 = 7,$$

где $\varepsilon_k = 0$.

Используя литературу [9], вычерчивают схему обмотки якоря.

Схема простой петлевой обмотки, рассчитанная для электродвигателя, приведена на рисунке 2.1.

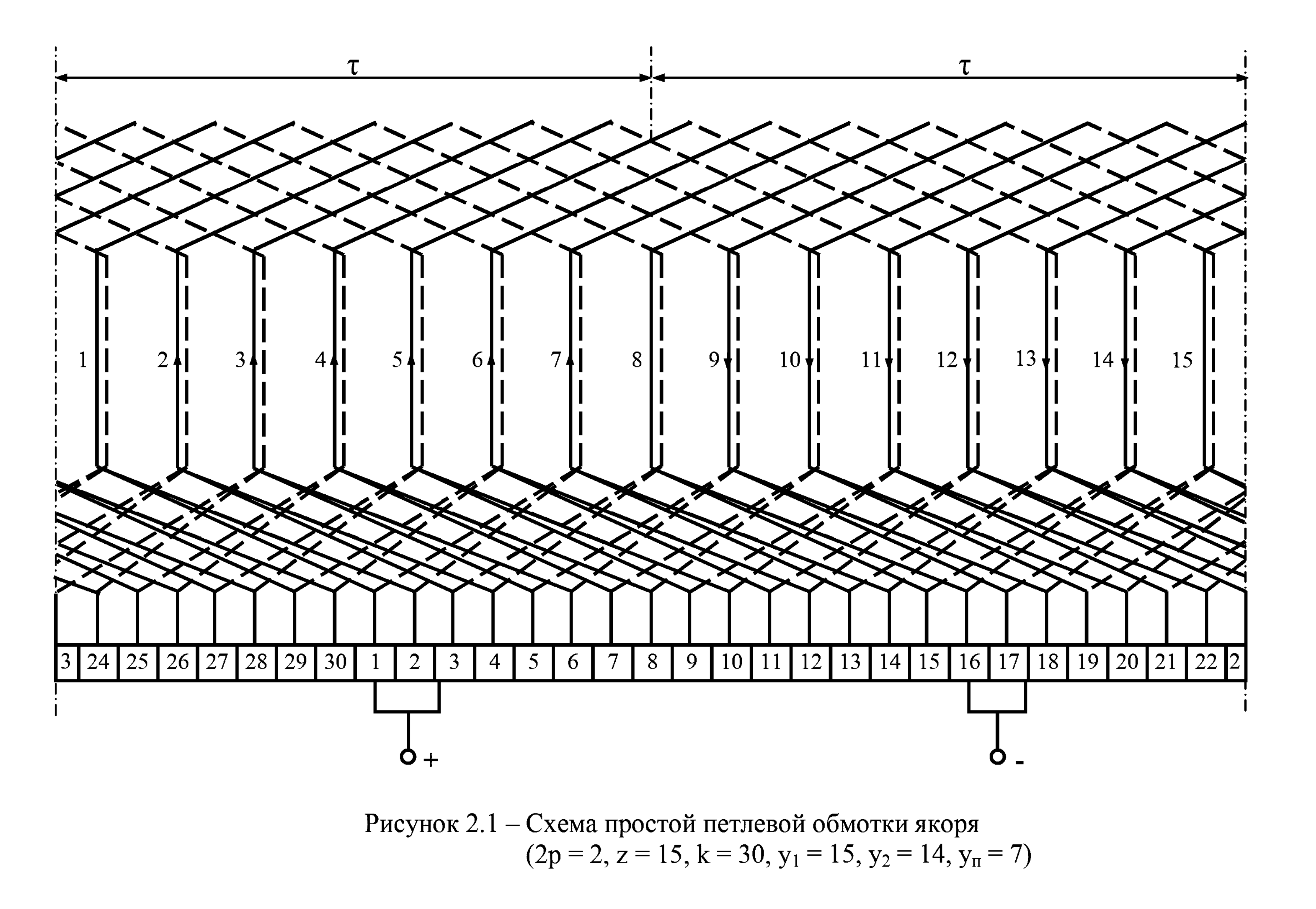


Рисунок 2.1 – Схема простой петлевой обмотки якоря
($2p = 2$, $z = 15$, $k = 30$, $y_1 = 15$, $y_2 = 14$, $y_п = 7$)

2.4 Размеры зубцов, пазов и проводников обмотки якоря

Выбираем для зубцового якоря овальную форму паза. Якорь выбираем со скосом пазов. Пазовая изоляция – эмалевая на эпоксидной основе, нанесенная методом напыления толщиной 0,15·10^{-3} м, то есть $b_{из} = 0{,}15\cdot10^{-3}$ м.

Принимаем всыпную обмотку с круглыми проводами с эмалевой изоляцией класса нагревостойкости В. Выбираем марку провода ПЭТВ ОСТ 160.505.001-74. Сердечник якоря выполняется шихтованным из листов электротехнической стали 1211 ГОСТ 21427.2-83 толщиной 0,5 мм.

2.4.1 Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

Для кратковременного режима работы ($S2$) принимаем $j' = 10\cdot10^6\ \dfrac{\text{А}}{\text{м}^2}$.

2.4.2 Сечение и диаметр провода обмотки якоря

а) предварительное значение площади поперечного сечения неизолированного провода

$$g' = \frac{I}{2a\cdot j'} = \frac{0{,}985}{2\cdot1\cdot10\cdot10^6} = 0{,}04925\cdot10^{-6}\ \text{м}^2.$$

б) окончательное значение площади поперечного сечения g, диаметр неизолированного провода d и диаметр изолированного провода $d_{из}$ выбираем из таблицы Б.2 приложения Б

$$g = 0{,}0491\cdot10^{-6}\ \text{м}^2,\quad d = 0{,}25\cdot10^{-3}\ \text{м},\quad d_{из} = 0{,}285\cdot10^{-3}\ \text{м}.$$

2.4.3 Окончательная плотность тока в проводнике обмотки якоря

$$j = \frac{I}{2a\cdot g} = \frac{0{,}985}{2\cdot1\cdot0{,}0491\cdot10^{-6}} = 10{,}03\cdot10^6\ \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

2.4.4 Бóльший диаметр овального паза якоря

$$b_{n1} = \frac{k_c\cdot B_z\cdot z\cdot D'\cdot Sin\dfrac{\alpha'}{2} - \pi\cdot D\cdot B_\delta}{k_c\cdot B_z\cdot z\cdot\left(1+Sin\dfrac{\alpha'}{2}\right)} =$$

$$= \frac{0{,}95 \cdot 0{,}95 \cdot 15 \cdot 0{,}037 \cdot Sin 0{,}2095 - \pi \cdot 0{,}038 \cdot 0{,}24}{0{,}95 \cdot 0{,}95 \cdot 15 \cdot (1 + Sin 0{,}2095)} = 0{,}0046 \text{ м},$$

где $k_c = 0{,}95$ – выбираем по таблице В.1 приложения В ;
принимаем $B_z = 0{,}95$ Тл ;

$$h_ш = 0{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$D' = D - 2 \cdot h_ш = 0{,}038 - 2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3} = 0{,}037 \text{ м};$$

$$\alpha' = \frac{2\pi}{z} = \frac{2 \cdot \pi}{15} = 0{,}419 \text{ рад.}$$

Принимаем $b_{n_1} = 0{,}0046$ м.

2.4.5 Меньший диаметр овального паза принимаем равным

$$b_{n2} = 0{,}0039 \text{ м.}$$

2.4.6 Периметр овального паза

$$П_n = b_{n1}\left(\frac{\pi + \alpha'}{2} + ctg\frac{\alpha'}{2}\right) - \frac{b_{n2}\left(1 - Sin\frac{\alpha'}{2}\right)}{Sin\frac{\alpha'}{2}} =$$

$$= 0{,}0046\left(\frac{\pi + 0{,}419}{2} + ctg 0{,}2095\right) - \frac{0{,}0039 \cdot (1 - Sin 0{,}2095)}{Sin 0{,}2095} = 0{,}0143 \text{ м.}$$

2.4.7 Высота паза якоря

$$h_n = b_{n1}\frac{\left(1 + Sin\frac{\alpha'}{2}\right)}{2 \cdot Sin\frac{\alpha'}{2}} - \frac{b_{n2} \cdot \left(1 - Sin\frac{\alpha'}{2}\right)}{2 \cdot Sin\frac{\alpha'}{2}} + h_ш =$$

$$= 0{,}0046 \cdot \frac{(1 + Sin 0{,}2095)}{2 \cdot Sin 0{,}2095} - \frac{0{,}0039 \cdot (1 - Sin 0{,}2095)}{2 \cdot Sin 0{,}2095} + 0{,}5 \cdot 10^{-3} = 0{,}0064 \text{ м}.$$

2.4.8 Площадь сечения овального паза якоря

$$S_n = \left[\frac{(b_{n1})^2}{4} \cdot \left(\frac{\pi + \alpha'}{2} + ctg\frac{\alpha'}{2}\right) - \frac{(b_{n2})^2}{4 \cdot tg\frac{\alpha'}{2}}\right] \cdot k_{ск} =$$

$$=\left[\frac{0{,}0046^2}{4}\cdot\left(\frac{\pi+0{,}419}{2}+ctg0{,}2095\right)-\frac{0{,}0039^2}{4\cdot tg0{,}2095}\right]\cdot 0{,}99=1{,}625\cdot 10^{-5}\ \text{м},$$

где $k_{ск}=\dfrac{l_\delta}{\sqrt{t_z^2+l_\delta^2}}=\dfrac{0{,}061}{\sqrt{0{,}008^2+0{,}061^2}}=0{,}99$,

$t_z=\dfrac{\pi D}{z}=\dfrac{\pi\cdot 0{,}039}{15}=0{,}008$ м.

2.4.9 Площадь поперечного сечения паза, заполненного обмоткой

а) площадь сечения пазовой изоляции

$$S_{из}=b_{из}\cdot \Pi_n=0{,}15\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}0143=2{,}145\cdot 10^{-6}\,\text{м}^2;$$

б) площадь сечения пазового клина

$$S_{кл}=b_{кл}\cdot h_{кл}=2{,}5\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}8\cdot 10^{-3}=2\cdot 10^{-6}\text{м}^2,$$

где $b_{кл}=2{,}5\cdot 10^{-3}$ м;

$h_{кл}=0{,}8\cdot 10^{-3}$ м;

в) площадь сечения паза без изоляции паза и клина

$$S_{по}=S_n-S_{из}-S_{кл}=1{,}625\cdot 10^{-5}-2{,}145\cdot 10^{-6}-2\cdot 10^{-6}=1{,}211\cdot 10^{-5}\text{м}^2.$$

2.4.10 Коэффициент заполнения паза изолированными проводами

$$k_з=\frac{d_{из}^2\cdot N_n}{S_{по}}=\frac{0{,}285^2\cdot 10^{-6}\cdot 104}{1{,}211\cdot 10^{-5}}=0{,}7.$$

Выбираем автоматизированную укладку обмотки в пазы якоря, так как $k_з=0{,}7$.

2.4.11 Проверка ширины зубца якоря

Так как пазы выполнены овальными с параллельными стенками, то ширина зубца постоянна по высоте зубца

$$b_z=\frac{B_\delta\cdot t_z}{k_c\cdot B_z}=\frac{0{,}24\cdot 0{,}008}{0{,}95\cdot 0{,}95}=0{,}0021\ \text{м}.$$

На рисунке 2.2 приведен эскиз паза якоря.

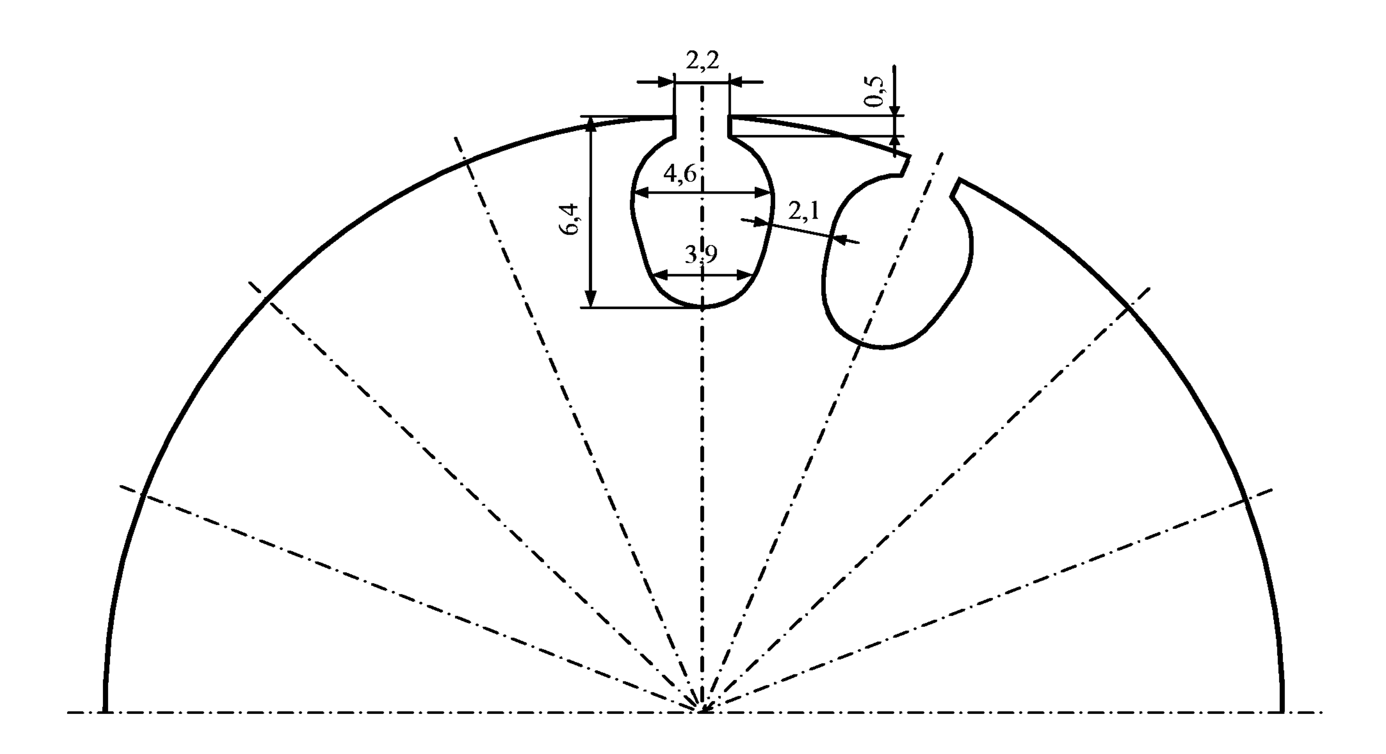


Рисунок 2.2 – Эскиз паза якоря

2.4.12 Средняя длина полувитка секции обмотки якоря

$$l_{a\,cp} = \frac{l_\delta}{k_{ck}} + l_{пл} + \frac{y_n}{z} \cdot \pi (D - h_n) =$$

$$= \frac{0{,}061}{0{,}99} + 0{,}003 + \frac{7}{15} \cdot \pi \cdot (0{,}038 - 0{,}0064) = 0{,}111 \text{ м}.$$

2.4.13 Сопротивление обмотки якоря при расчетной температуре якоря

$$R_a = k_\Theta \cdot R_{a\,20} = 1{,}24 \cdot 15{,}47 = 19{,}18 \text{ Ом},$$

где $k_\Theta = 1 + 0{,}004 \cdot \vartheta = 1 + 0{,}004 \cdot 60 = 1{,}24$;

ϑ – расчетная температура для изоляции класса В принимаем равной $60^0 C$;

$$R_{a\,20} = \frac{N \cdot l_{a\,cp}}{57(2a)^2 \cdot g} \cdot 10^{-6} = \frac{1560 \cdot 0{,}111 \cdot 10^{-6}}{57 \cdot 4 \cdot 0{,}0491 \cdot 10^{-6}} = 15{,}47 \text{ Ом}.$$

2.5 Коллектор и щетки

Для проектируемого электродвигателя выбираем коллектор на пластмассе. Предварительный диаметр коллектора:

$$D'_к = 0{,}8 \cdot D = 0{,}8 \cdot 0{,}038 = 0{,}03 \text{ м.}$$

2.5.1 Относительное коллекторное деление для простой петлевой обмотки

$$t_к^* < \frac{0{,}8 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_\delta)}{\left(\frac{2 \cdot k}{z} - 0{,}5\right) \cdot 2p} = \frac{0{,}8 \cdot \pi \cdot (1 - 0{,}7)}{\left(\frac{2 \cdot 30}{15} - 0{,}5\right) \cdot 2} = 0{,}108 \text{ .}$$

Принимаем $t_k^* = 0{,}1$.

2.5.2 Коллекторное деление

$$t_к = t_к^* \cdot D'_к = 0{,}1 \cdot 0{,}03 = 0{,}003 \text{ м .}$$

2.5.3 Ширина коллекторной пластины

$$\beta_к = t_к - \beta_и = 0{,}003 - 0{,}0007 = 0{,}0023 \text{ м ,}$$

где $\beta_и = 0{,}0007$ м .

2.5.4 Окончательный диаметр коллектора

$$D_к = \frac{k \cdot (\beta_и + \beta_к)}{\pi} = \frac{30 \cdot (0{,}0007 + 0{,}0023)}{\pi} = 0{,}029 \text{ м .}$$

2.5.5 Окружная скорость коллектора

$$V_к = \frac{\pi \cdot D_к \cdot n_{ном}}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}029 \cdot 5500}{60} = 8{,}35 \ \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ .}$$

2.5.6 Площадь поперечного сечения щетки

Выбираем марку щетки ЭГ2А: $\Delta U_{щп} = 2{,}6$ В ; $j_{щд} = 10 \cdot 10^4 \ \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$;

$\mu_т = 0{,}25$; $\rho_щ = 2{,}5 \cdot 10^4 \ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$

$$S_щ = \frac{I}{p \cdot j_{щд}} = \frac{0,985}{1 \cdot 10 \cdot 10^4} = 9,85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

2.5.7 Размеры щетки

Предварительные размеры щетки

$$b'_щ = 1,3 \cdot t_к = 1,3 \cdot 0,003 = 0,0039 \text{ м},$$

$$a'_щ = \frac{S_щ}{b_щ} = \frac{9,85 \cdot 10^{-6}}{0,0039} = 0,0025 \text{ м}.$$

Уточняем размеры щеток, выбирая стандартные размеры щетки по таблице Д.2 приложения Д: $b_щ = 0,004$ м; $a_щ = 0,005$ м; $h_щ = 2 \cdot a_щ = 0,010$ м.

2.5.8 Окончательная плотность тока под щетками

$$j_щ = \frac{I}{p \cdot a_щ \cdot b_щ} = \frac{0,985}{1 \cdot 0,005 \cdot 0,004} = 4,9 \cdot 10^4 \ \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

2.5.9 Длина коллектора

а) активная длина коллектора по оси вала

$$l'_к = 1,8 \cdot a_щ = 1,8 \cdot 0,005 = 0,009 \text{ м};$$

б) полная длина коллектора по оси вала

$$l_к = l'_к + 4 \cdot d = 0,009 + 4 \cdot 0,0025 = 0,01 \text{ м}.$$

2.5.10 Проверка величины ЭДС

$$E = U_{ном} - I \cdot R_a - \Delta U_щ = 110 - 0,985 \cdot 19,18 - 1,27 = 89,84 \text{ В},$$

где $\Delta U_щ = \Delta U_{щп} \cdot \dfrac{j_щ}{j_{щд}} = 2,6 \cdot \dfrac{4,9 \cdot 10^4}{10 \cdot 10^4} = 1,27$ В.

При этом должно выполняться условие:

$$\left| \frac{E - E'}{E} \right| \le 0,03,$$

где $E' = \dfrac{p \cdot N \cdot \Phi_\delta \cdot n_{ном}}{a \cdot 60} = \dfrac{1 \cdot 1560 \cdot 6,15 \cdot 10^{-4} \cdot 5500}{1 \cdot 60} = 87,94$ В,

$$\Phi_\delta = B_\delta \cdot l_\delta \cdot b_\delta = 0{,}24 \cdot 0{,}061 \cdot 0{,}042 = 6{,}15 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

$$\left| \frac{89{,}84 - 87{,}94}{89{,}84} \right| = 0{,}021 < 0{,}03 \text{ – условие выполняется.}$$

2.6 Коммутационные параметры

2.6.1 Ширина коммутационной зоны

$$b_{зк} = b_щ \cdot \frac{D}{D_к} + t_к \left(\frac{k}{z} + \left| \frac{k}{2p} - y_1 \right| - \frac{a}{p} \right) \cdot \frac{D}{D_к} =$$

$$= 0{,}004 \frac{0{,}038}{0{,}029} + 0{,}003 \left(\frac{30}{15} + \left| \frac{30}{2} - 15 \right| - \frac{1}{1} \right) \cdot \frac{0{,}038}{0{,}029} = 0{,}013 \text{ м.}$$

Для благоприятной коммутации необходимо выполнение соотношения

$$b_{зк} < 0{,}8 \cdot (\tau - b_\delta) ;$$

$$0{,}013 < 0{,}8 \cdot (0{,}06 - 0{,}042) \text{ или } 0{,}011 < 0{,}014 ,$$

условие выполняется.

2.6.2 Удельная магнитная проводимость пазового рассеяния овального паза

$$\lambda_п = \left[0{,}6 \frac{2 \cdot h_п}{b_{п1} + b_{п2}} + \frac{l_л}{l_\delta} + 0{,}92 \lg\left(\frac{\pi \cdot t_z}{b_ш} \right) \right] \cdot 10^{-6} =$$

$$= \left[0{,}6 \cdot \frac{2 \cdot 0{,}0064}{0{,}0046 + 0{,}0039} + \frac{0{,}05}{0{,}061} + 0{,}92 \lg\left(\frac{\pi \cdot 0{,}008}{0{,}0022} \right) \right] \cdot 10^{-6} =$$

$$= 2{,}69 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Вб}}{\text{А} \cdot \text{м}},$$

где $l_л = l_{a\,ср} - l_\delta = 0{,}111 - 0{,}061 = 0{,}05$ м ;

$b_ш = 8 \cdot d_{из} = 8 \cdot 0{,}285 \cdot 10^{-3} = 0{,}0022$ м .

2.6.3 Среднее значение реактивной ЭДС в короткозамкнутой секции якоря

$$e_p = 2 \cdot \omega_c \cdot \lambda_п \cdot l_\delta \cdot A \cdot V_a = 2 \cdot 26 \cdot 2{,}69 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}061 \cdot 6439 \cdot 10{,}94 = 0{,}6 \text{ В .}$$

2.6.4 Среднее значение ЭДС поля якоря

$$e_a = \frac{0{,}8 \cdot \pi \cdot \omega_c \cdot A \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot V_a}{\tau - b_\delta} \cdot 10^{-6} =$$

$$= \frac{0{,}8 \cdot \pi \cdot 26 \cdot 6439 \cdot 0{,}06 \cdot 0{,}061 \cdot 10{,}94}{0{,}06 - 0{,}042} \cdot 10^{-6} = 0{,}93 \text{ В}.$$

2.6.5 Среднее значение результирующей ЭДС в короткозамкнутой секции обмотки якоря

$$e = e_p + e_a = 0{,}6 + 0{,}93 = 1{,}53 \text{ В}.$$

Коммутация благоприятная.

Перечень условных буквенных обозначений физических величин

I_a - ток якоря, А ;
I - ток двигателя, А ;
$P_{ном}$ - номинальная мощность электродвигателя, Вт ;
η - коэффициент полезного действия двигателя;
$U_{ном}$ - номинальное напряжение электродвигателя, В ;
$P_{эм}$ - электромагнитная мощность, Вт ;
D - диаметр якоря, м ;
α_δ - коэффициент полюсного перекрытия;
B_δ - индукция в воздушном зазоре, Тл ;
B_d - индукция магнита в оптимальной рабочей точке, Тл;
A' - предварительное значение токовой линейной нагрузки, А/м ;
$n_{ном}$ - номинальная частота вращения вала, об/мин ;
λ - коэффициент, отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру;
l_δ - расчетная длина якоря, м ;
V_a - окружная скорость вращения якоря, м/с ;
τ - полюсное деление, м ;
$2p$ - число полюсов;
b_δ - расчетная ширина полюсного наконечника, м ;
f_2 - частота перемагничивания стали, Гц ;
p - число пар полюсов;
N' - предварительное число проводников обмотки якоря;
$2a$ - число параллельных ветвей обмотки якоря;
z - число пазов якоря;
k - число коллекторных пластин;
ω_c' - предварительное число витков в секции обмотки якоря;
ω_c - число витков в секции обмотки якоря;
N - число проводников обмотки якоря;
N_n - число проводников в пазу якоря;
A - токовая линейная нагрузка А/м;
y_1 - первый частичный шаг;
ε_k - укорочение шага обмотки;
y - результирующий шаг;
y_k - шаг обмотки по коллектору;

y_2 - второй частичный шаг;
$y_п$ - шаг обмотки по пазам;
ε - укорочение шага обмотки по пазам;
j' - предварительное значение плотности тока в обмотке якоря, А/м^2;
j - плотность тока в обмотке якоря, А/м^2 ;
g - сечение провода обмотки якоря, м^2 ;
d - диаметр неизолированного провода обмотки якоря, м ;
$d_{из}$ - диаметр изолированного провода обмотки якоря, м ;
$b_{п_1}$ - бóльший диаметр паза якоря, м ;
k_c - коэффициент заполнения пакета якоря сталью;
B_z - индукция в зубце якоря, Тл ;
α' - центральный угол на один паз, рад ;
$h_ш$ - высота шлица паза якоря, м ;
$b_{п_2}$ - меньший диаметр паза якоря, м ;
$П_п$ - периметр паза, м ;
$h_п$ - высота паза якоря, м ;
$S_п$ - площадь паза якоря в свету, м^2 ;
$k_{ск}$ - коэффициент скоса пазов якоря;
t_z - зубцовое деление якоря, м ;
$S_{из}$ - площадь сечения пазовой изоляции, м^2 ;
$b_{из}$ - толщина пазовой изоляции, м ;
$b_{кл}$ - ширина клина, м ;
$h_{кл}$ - высота клина, м ;
$S_{кл}$ - площадь сечения клина, м^2 ;
$S_{п\,о}$ - площадь сечения паза, заполненного обмоткой, м^2 ;
$k_з$ - коэффициент заполнения паза проводниками;
b_z - ширина зубца якоря, м ;
$l_{a\,ср}$ - средняя длина полувитка секции обмотки якоря, м ;
$l_{пл}$ - прямолинейный отрезок лобовой части обмотки якоря, м ;
R_a - сопротивление обмотки якоря при расчетной температуре, Ом ;
k_θ - коэффициент увеличения сопротивления обмотки якоря при увеличении температуры;
$R_{a_{20}}$ - сопротивление обмотки якоря при температуре 20^0 С;
ϑ - расчетная температура обмотки якоря, ^{0} С ;

$D_к'$ - предварительный диаметр коллектора, м ;
$t_к^*$ - относительное коллекторное деление;
γ - число перекрываемых щеткой коллекторных пластин;
$t_к$ - коллекторное деление, м ;
$\beta_к$ - ширина коллекторной пластины, м ;
$\beta_и$ - ширина изоляционной пластины коллектора, м ;
$V_к$ - окружная скорость коллектора, м/с ;
$S_щ$ - площадь сечения щетки, м^2 .
$j_щ$ - плотность тока для щетки, А/м^2 ;
$b_щ'$ - предварительная ширина щетки, м ;
$a_щ'$ - предварительная длина щетки, м ;
$a_щ$ - ширина щетки, м ;
$b_щ$ - длина щетки, м ;
$h_щ$ - высота щетки, м ;
$l_к'$ - активная длина коллектора, м ;
$l_к$ - полная длина коллектора, м ;
E - ЭДС обмотки якоря, В ;
$\Delta U_щ$ - падение напряжения на щетках, В ;
Φ_δ - магнитный поток в воздушном зазоре под одним полюсом, Вб ;
$b_{з\,к}$ - ширина коммутационной зоны, м ;
$\lambda_п$ - магнитная проводимость пазового рассеяния, Вб/А·м ;
$l_л$ - длина лобовых частей обмотки якоря, м ;
$b_ш$ - ширина шлица паза якоря, м ;
$e_р$ - реактивная ЭДС в короткозамкнутой секции, В ;
$e_а$ - ЭДС поля в короткозамкнутой секции, В ;
e - результирующая ЭДС в секции обмотки якоря, В .

Список использованных источников

1 **Шеминов, В. Г.** Проектирование коллекторных двигателей постоянного тока малой мощности / В. Г. Шеминов, Ю. П. Широков, И. А. Цырлин // Электротехника. – М., 1984. - № 9. – С. 42 – 44.

2 **Ермолин, Н. П.** Расчет коллекторных машин малой мощности : учеб. пособие / Н. П. Ермолин. – изд. 2-е. – Л.: Энергия, 1973. – 213 с.

3 **Постоянные магниты** : справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1980. – 480 с.

4 **Проектирование электрических машин** : учеб. для вузов. – В 2-х кн.: Кн.2 / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с. – ISBN 5 – 283 – 00725 – 1 (кн. 2).

5 **Ерунов, В.П.** Магнитоэлектрический двигатель с комбинированным магнитопроводом : дисс. на соиск. уч. степени кандидата техн. наук : шифр 05.09.01 : защищена 13.05.1987; утв. 9.09.1987 / Ерунов Василий Петрович. – Оренбург, 1987.

6 **Ерунов, В.П.** Расчет коллекторного двигателя постоянного тока малой мощности с возбуждением постоянными магнитами : учеб. пособие / В. П. Ерунов. – изд. 2-е, перераб. и доп. – Оренбург: ОГУ, 2002. – 109 с. – ISBN 5 – 7410 – 0596 – 9.

7 **Проектирование электрических машин** : учеб. для вузов. – В 2-х кн. / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – Кн. 1 – 464 с. – ISBN 5 – 283 – 00724 – 3 (кн.1).

8 **Справочник по электрическим машинам**: в 2 т. / под ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова.– М.: Энергоатомиздат. 1988. – Т. 1. – 456 с. – ISBN 5 – 283 – 00531 – 3 (т. 2).

9 **Жерве, Г. К.** Обмотки электрических машин / Г. К. Жерве – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 400 с. – ISBN 5 – 283 – 04458 – 0.

10 **Осин, И. Л**. Устройство и производство электрических машин малой мощности: учеб. пособие для СПТУ / И. Л. Осин, М. В. Антонов– М.: Высш. шк. 1988. – 215 с.: ил.

Приложение А

(справочное)

Номинальные диаметры и длины в машиностроении по ГОСТ 6636 – 69

В стандарте установлены следующие предпочтительные ряды размеров: *R5a*; *R10a*; *R20a* и *R40a*.

Таблица А.1

Ряд *R5a*	Ряд *R10a*	Ряд *R20a*	Ряд *R40a*	Ряд *R5a*	Ряд *R10a*	Ряд *R20a*	Ряд *R40a*
0,001	0,001	0,001	0,001	0,025	0,025	0,025	0,025 0,026
		0,002	0,002 0,003			0,028	0,028 0,030
	0,004	0,004	0,004 0,005		0,032	0,032	0,032 0,034
		0,006	0,006 0,007			0,036	0,036 0,038
0,008	0,008	0,008	0,008 0,009	0,04	0,040	0,040	0,040 0,042
		0,010	0,010 0,011			0,045	0,045 0,048
	0,012	0,012	0,012 0,013		0,050	0,050	0,050 0,052
		0,014	0,014 0,015			0,056	0,056 0,058
0,016	0,016	0,016	0,016 0,017	0,063	0,063	0,063	0,063 0,065
		0,018	0,018 0,019			0,071	0,071 0,075
	0,020	0,020	0,020 0,021		0,080	0,080	0,080 0,085
		0,022	0,022 0,024			0,090	0,090 0,095
0,10	0,10	0,100	0,100 0,105	0,630	0,630	0,630	0,630 0,650
		0,110	0,110 0,115			0,710	0,710 0,750
	0,12	0,120	0,120 0,130		0,800	0,800	0,800 0,850
		0,140	0,140 0,150			0,900	0,900 0,950

Продолжение таблицы А.1

Ряд *R5a*	Ряд *R10a*	Ряд *R20a*	Ряд *R40a*	Ряд *R5a*	Ряд *R10a*	Ряд *R20a*	Ряд *R40a*
0,16	0,160	0,160	0,160	1,0	1,0	1,0	1,0
			0,170				1,05
		0,180	0,180			1,1	1,1
			0,190				1,15
	0,200	0,200	0,200		1,2	1,2	1,2
			0,210				1,3
		0,220	0,220			1,4	1,4
			0,240				1,5
0,25	0,250	0,250	0,250	1,6	1,6	1,6	1,6
			0,260				1,7
		0,280	0,280			1,8	1,8
			0,300				1,9
	0,320	0,320	0,320		2,0	2,0	2,0
			0,340				2,1
		0,360	0,360			2,2	2,2
			0,380				2,4
0,4	0,400	0,400	0,400	2,5	2,5	2,5	2,5
			0,420				2,6
		0,450	0,450			2,8	2,8
			0,480				3,0
	0,500	0,500	0,500		3,2	3,2	3,2
			0,520				3,4
		0,560	0,560			3,6	3,6
			0,580				3,8
4,0	4,0	4,0	4,0	25	25	25	25
			4,2				26
		4,5	4,5			28	28
			4,8				30
	5,0	5,0	5,0		32	32	32
			5,2				34
		5,6	5,6			36	36
			5,0				38
6,3	6,3	6,3	6,3	40	40	40	40
			6,5				42
		7,1	7,1			45	45
			7,5				48
	8,0	8,0	8,0		50	50	50
			8,5				53
		9,0	9			56	56
			9,5				60

Продолжение таблицы А.1

Ряд *R5a*	Ряд *R10a*	Ряд *R20a*	Ряд *R40a*	Ряд *R5a*	Ряд *R10a*	Ряд *R20a*	Ряд *R40a*
10	10	10	10 10,5	63	63	63	63 65
		11	11 11,5			71	71 75
	12	12	12 13		80	80	80 85
		14	14 15			90	90 95
16	16	16	16 17	100	100	100	100 105
		18	18 19			110	110 120
	20	20	20 21		125	125	125 130
		22	22 24			140	140 150

Приложение Б

(справочное)

Обмоточные провода

Круглые медные эмалированные провода широко применяют в электромашиностроении. Они имеет небольшую толщину изоляции, в 1,5 – 2,5 раза меньшую, чем провода, покрытые эмалью и хлопчатобумажной или шелковой тканью. Это повышает теплопроводность и улучшает коэффициент заполнения паза.

Свойства изоляции проводов определяются электроизоляционными лаками. Эмали и лаки могут иметь синтетическую или масляно-смоляную основу. Более 95% всех эмалированных проводов изготовляется с применением синтетических лаков, так как лаки на масляно-смоляной основе требуют при изготовлении растительные масла.

Для производства эмалированных проводов классов нагревостойкости B, F и H (температурный индекс (ТИ) 130, 155 и 180) используются лаки на полиэфирной, полиэфироимидной, полиэфирциануратимидной и полиэфирамидной основах. Эта группа лаков является в настоящее время основой при производстве эмалированных проводов.

В таблице Б.1 приведены основные данные медных эмалированных проводов – а в таблице Б.3 – их ассортимент и размеры.

Основными типами высокопрочных эмалированных проводов являются провода ПЭВ-1 и ПЭВ-2, эмалированные винифлексовой изоляцией, и провода повышенной нагревостойкости ПЭТВ.

Круглые медные провода марок ПЭТВ-1 и ПЭТВ-2 являются основными проводами класса нагревостойкости В (ТИ 130).

Для механизированной намотки электродвигателей единых серий применяются провода марки ПЭТВ, которые имеют большую толщину изоляции и лучшие механические свойства. Провода ПЭТВМ выпускаются в диапазоне диаметров 0,25 – 1,40 мм. Несмотря на увеличение толщины изоляции в среднем на 0,01 – 0,02 мм по обе стороны, провода марки ПЭТВМ имеют такую же эластичность, что и провода ПЭТВ.

К проводам класса нагревостойкости F (ТИ 155) относятся провода марок ПЭТ-155, ПЭТП-155, ПЭТМ.

По своим электроизоляционным свойствам провода марки ПЭТ идентичны проводам ПЭТВ, но имеют повышенную стойкость к действию теплового удара.

Провода ПЭТП имеют диапазон сечений 1,6 – 11,2 мм^2.

Провода для механизированной намотки ПЭТМ выпускаются в диапазоне диаметров 0,8 – 1,32 мм.

Таблица Б.1 – Нагревостойкость, температурный индекс и конструктивные данные основных типов медных эмалированных проводов

Марка провода	Тем-пера-тур-ный индекс	Класс нагре-вос-тойко-сти	Тип эмалевой изоляции	Номиналь-ные разме-ры токо-проводя-щей жилы, мм	Двухсто-роння толщина изоляции, мм
ПЭЛ	105	А	Эмаль на масляно-смоляной основе	0,02–2,50	0,010–0,02
ПЭВ-1	105	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной основе	0,02–2,50	0,01–0,02 0,02–0,085
ПЭВ-2	105	А	То же с утолщенной изоляцией	0,02–2,50	0,025–0,090
ПЭМ-1	105	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной (поливинилформалевой) основе	0,02–2,50	0,02–0,08
ПЭМ-2	105	А	То же с утолщенной изоляцией	0,06–2,50 0,06–0,45	0,025–0,085 0,033–0,085
ПЭВТЛ-1	120	Е	Высокопрочная эмаль на полиуретановой ос-нове	0,05–1,60	0,015–0,07
ПЭТВЛ-2	120	Е	То же с утолщенной изоляцией	0,05–1,60	0,02–0,08
ПЭВТЛК	120	Е	Двойная эмаль на осно-ве полиуретановых и полиамидных смол	0,05–1,60	0,03–0,05
ПЭТВ-1	130	В	Высокопрочная эмаль на полиэфирной основе (лак ПЭ-943)	0,063–2,50	0,025–0,09
ПЭТВ-2	130	В	То же (лак ПЭ-939)	0,063–2,50	0,025–0,09
ПЭТ-155 и ПЭТВ	155	F	Высокопрочная эмаль на полиэфироимидной основе	0,06–2,44	0,025–0,09
ПЭТ-200	200	С	Полиамидные лаки, обеспечивающие высо-кую механическую прочность и нагрево-стойкость	0,05–2,50	0,025–0,06

Таблица Б.2 – Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2
0,08	0,1	0,00502	(0,53)	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,1	0,122	0,00785	0,6	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	(0,67)	0,73	0,353
(0,132)	0,154	0,01368	0,71	0,77	0,396
0,14	0,162	0,01539	0,75	0,815	0,442
0,15	0,18	0,01767	0,8	0,865	0,503
0,16	0,19	0,0201	0,85	0,915	0,567
0,17	0,2	0,0227	0,9	0,965	0,636
0,18	0,21	0,0255	0,95	1,015	0,709
(0,19)	0,22	0,0284	1	1,08	0,785
0,2	0,23	0,0314	1,06	1,14	0,883
(0,212)	0,242	0,0353	1,12	1,2	0,985
0,224	0,259	0,0394	1,18	1,26	1,094
(0,236)	0,271	0,0437	1,25	1,33	1,227
0,25	0,285	0,0491	1,32	1,405	1,368
(0,265)	0,3	0,0552	1,40	1,485	1,539
0,28	0,315	0,0616	1,5	1,585	1,767
(0,3)	0,335	0,0707	1,6	1,685	2,011
0,315	0,35	0,0779	1,7	1,785	2,27
0,335	0,37	0,0881	1,8	1,895	2,54
0,355	0,395	0,099	1,9	1,995	2,83
0,375	0,415	0,1104	2	2,095	3,14
0,4	0,44	0,1257	2,12	2,22	3,53
0,425	0,465	0,1419	2,24	2,34	3,94
0,45	0,49	0,159	2,36	2,46	4,36
(0,475)	0,515	0,1772	2,5	2,6	4,91
0,5	0,545	0,1963			

Примечание – Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только при обосновании технико-экономической целесообразности.

Таблица Б.3 – Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1, ПЭТ-200, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТВ

Номинальный диаметр голой проволоки, мм	Расчетный наружный диаметр, мм			Номинальный диаметр голой проволоки, мм	Расчетный наружный диаметр, мм		
	ПЭЛ	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1	ПЭТ-200, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТВ		ПЭЛ	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1	ПЭТ-200, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТВ
0,02	0,03	0,03	–	0,425	0,460	0,455	0,465
0,025	0,035	0,035	–	0,45	0,485	0,48	0,49
0,032	0,04	0,042	–	0,475	0,510	0,505	0,515
0,04	0,05	0,052	–	0,50	0,54	0,545	0,555
0,05	0,062	0,07	–	0,53	0,57	0,575	0,585
0,06	0,072	0,083	0,087	0,56	0,60	0,605	0,615
0,07	0,082	0,093	0,097	0,60	0,64	0,645	0,655
0,08	0,092	0,103	0,107	0,63	0,67	0,675	0,685
0,09	0,102	0,113	0,117	0,67	0,71	0,715	0,730
0,10	0,125	0,123	0,127	0,71	0,76	0,755	0,770
0,112	0,135	0,143	0,147	0,75	0,80	0,80	0,815
0,125	0,140	0,148	0,153	0,85	0,90	0,90	0,915
0,132	0,147	0,155	0,159	0,90	0,95	0,95	0,965
0,14	0,155	0,163	0,167	0,95	1,00	1,00	1,015
0,15	0,168	0,177	0,180	1,00	1,06	1,07	1,08
0,16	0,178	0,187	0,190	1,06	1,12	1,13	1,14
0,17	0,188	0,197	0,200	1,12	1,18	1,19	1,20
0,18	0,198	0,207	0,210	1,18	1,24	1,25	1,26
0,19	0,208	0,217	0,220	1,25	1,31	1,32	1,33
0,20	0,222	0,227	0,230	1,32	1,38	1,39	1,40
0,212	0,234	0,239	0,242	1,40	1,465	1,47	1,48
0,224	0,246	0,251	0,254	1,50	1,565	1,57	1,58
0,236	0,258	0,266	0,271	1,60	1,665	1,67	1,68
0,25	0,272	0,28	0,285	1,70	1,765	1,77	1,78
0,265	0,291	0,295	0,30	1,80	1,865	1,875	1,88
0,28	0,306	0,31	0,315	1,90	1,965	1,975	1,98
0,30	0,326	0,33	0,335	2,00	2,065	2,075	2,08
0,315	0,345	0,345	0,350	2,12	2,185	2,205	2,21
0,335	0,365	0,365	0,370	2,24	2,305	2,325	2,33
0,355	0,385	0,385	0,395	2,36	2,425	2,445	2,45
0,375	0,405	0,405	0,415	2,50	2,565	2,585	2,59
0,40	0,435	0,43	0,44				

Приложение В

(справочное)

Коэффициент заполнения пакета сталью

Таблица В.1 – Коэффициент заполнения пакета сталью k_c

Толщина листа, мм	Изоляция листов	
	оксидированных	лакированных
1	0,98	0,97
0,5	0,95	0,93
0,35	0,93	0,91
0,3	0,92	0,89
0,28	0,91	0,88

Для изготовления магнитопроводов электрических машин применяются листовая электротехническая сталь, стальное литье, листовая сталь, чугун и магнитодиэлектрики [8].

Тонколистовая электротехническая сталь по ГОСТ 21427.0-75 разделяется на 38 марок. Она изготовляется в виде рулонов, листов и резаной ленты.

Обозначения марок стали состоят из четырех цифр. Первая обозначает класс по структурному состоянию и виду прокатки, вторая – примерное содержание кремния, третья – группу по основной нормируемой характеристике. Эти три первые цифры в обозначении марки означают тип стали, а четвертая - порядковый номер типа стали.

Сталь подразделяют по структурному состоянию и виду прокатки на 3 класса: 1 – горячекатанную изотропную, 2 – холоднокатанную изотропную, 3 – холоднокатанную анизотропную с ребровой текстурой.

По содержанию кремния сталь подразделяют на 6 групп: 0 – с содержанием кремния, равном 0,4% включительно (нелегированная); 1 – с содержанием кремния от 0,4 до 0,8%; 2 – с содержанием кремния, равным 0,8 – 1,8%; 3 – с 1,8 – 2,8%; 4 – с 2,8 – 3,8%; 5 – с 3,4 – 4,8%.

По ГОСТ 21427.0-75 химический состав стали не нормируется.

По основной нормируемой характеристике стали делятся на 5 групп: 0 – удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1.7/50}$); 1 – удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1.5/50}$); 2 – удельные потери при магнитной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц ($p_{1.0/400}$); 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$); 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (B_{10}).

Свойства стали зависят от содержания кремния и условий ее изготовления. Сталь с низким содержанием кремния имеет меньшую относительную магнитную проницаемость и бóльшие магнитные потери, а также бóльшую индукцию насыщения. Стали с высоким содержанием кремния имеют меньшие потери на вихревые токи и гистерезис и высокую относительную магнитную

проницаемость в слабых и средних полях. Содержание кремния снижает плотность и повышает удельное электрическое сопротивление стали.

В электротехнической промышленности широко применяются анизотропные холоднокатанные стали, имеющие в направлении проката более высокую проницаемость и меньшие потери в слабых полях, чем горячекатанные стали. В анизотропных сталях магнитные свойства вдоль прокатки и направлении, перпендикулярном прокатке, - различные.

В последние годы созданы изотропные холоднокатанные стали с кубической текстурой, имеющие высокие магнитные качества как в направлении проката, так и в перпендикулярном направлении.

Горячекатанная изотропная тонколистовая электротехническая сталь изготовляется в виде листов следующих марок: 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1313, 1411, 1412, 1413, 1511, 1512, 1513, 1514, 1521, 1561, 1562, 1571 и 1572.

На электротехнические заводы листы поставляются в термически обработанном состоянии. По состоянию поверхности сталь выпускается с травленой (Т) и с нетравленой (НТ) поверхностью. Поверхность листов должна быть гладкой, без ржавчины, отслаивающей окалины, налета порошкообразных веществ, препятствующих нанесению изоляции.

На электротехническую холоднокатанную анизотропную тонколистовую сталь, изготовляемую в виде рулонов, листов и резаной ленты, распространяется ГОСТ 21427.1-83, соответствующий стандарту СТ СЭВ 102-85. Эта сталь выпускается следующих марок: 3311, 3412, 3413, 3414, 3415, 3416, 3404, 3405 и 3406.

Сталь поставляется в термически обработанном состоянии. Сталь толщиной 0,28; 0,30 и 0,35 мм изготовляют с электроизоляционным термостойким покрытием, а сталь толщиной 0,50 мм – без электроизоляционного термостойкого покрытия или с покрытием, не ухудшающим штампуемость. Магнитные свойства стали приведены в приложении Г.

Тонколистовая холоднокатанная изотропная электротехническая сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты и имеет следующие марки: 2011, 2012, 2013, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2312, 2411 и 2412 (ГОСТ 21427.2-83).

По точности прокатки, неплоскостности, коэффициенту заполнения подразделения те же, что и у анизотропной стали. По типу покрытия эти стали выпускаются с термостойким электроизоляционным покрытием (ЭТ),с нетермостойким (Э) и без покрытия (БП). Изотропную рулонную сталь изготовляют толщиной 0,35; 0,5; 0,65 мм и шириной 500, 530, 600, 670, 750, 860 и 1000 мм.

Магнитные свойства сталей характеризуют кривые намагничивания, приведенные в приложении Г. Потери в стали от вихревых токов и гистерезиса определяются удельными потерями, т.е. потерями в 1 кг стали при частоте 50 Гц и синусоидальном напряжении, их значения приведены в приложении И.

Для магнитопроводов, работающих в постоянных магнитных полях, применяются техническое железо с содержанием углерода менее 0,04%, а также углеродистые стали и чугуны.

Для изготовления небольших магнитопроводов используются магнитодиэлектрики – материалы, имеющие высокие магнитные свойства и высокое электрическое сопротивление

Листовая сталь 1211 толщиной 0,5 или 1 мм применяется для изготовления главных полюсов машин постоянного тока. Это ведет к улучшению k_c, который достигает в этом случае значений 0,95 – 0,98.

Листовая сталь и Ст3 в виде проката применяются для станин машин постоянного тока. Толщина листовой стали колеблется от 1,5 до 12 мм. Магнитные свойства такие же, как и у литой стали.

Приложение Г

(справочное)

Кривые намагничивания сталей

Таблица Г.1 – Листовая электротехническая сталь марок 1211, 1212, 1311 (слабо- и среднелегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	153	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	318	324	330	337	344	352	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	701	720	739	859	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1 010	1 040	1 070	1 100
1,3	1 140	1 180	1 220	1 260	1 300	1 340	1 380	1 430	1 480	1 530
1,4	1 580	1 640	1 710	1 780	1 860	1 950	2 050	2 150	2 260	2 380
1,5	2 500	2 640	2 790	2 950	3 110	3 280	3 460	3 660	3 880	4 120
1,6	4 370	4 630	4 910	5 220	5 530	5 880	6 230	6 600	6 980	7 370
1,7	7 780	8 200	8 630	9 070	9 630	10 100	10 600	11 100	11 600	12 200
1,8	12 800	13 400	14 200	14 600	15 200	15 900	16 600	17 300	18 000	18 800
1,9	19 700	20 600	21 600	22 600	23 600	24 600	25 600	26 800	28 200	29 600
2	31 000	32 500	34 300	36 500	39 000	42 000	45 500	49 500	54 500	59 500
2,1	65 500	72 500	80 000	88 000	96 000	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000
2,2	144 000	152 000	160 000	168 000	176 000	184 000	192 000	200 000	208 000	216 000
2,3	224 000	232 000	240 000	248 000	256 000	264 000	272 000	280 000	288 000	296 000
2,4	304 000	312 000	320 000	328 000	336 000	344 000	352 000	360 000	368 000	276 000
2,5	384 000	392 000	400 000	408 000	416 000	424 000	432 000	440 000	448 000	456 000

Таблица Г.2 – Листовая электротехническая сталь марок 1411, 1412, 1413 (повышеннолегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,2	44	45	47	48	49	50	51	52	54	55
0,3	56	57	58	59	60	61	63	64	65	66
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	189	194	199	205	211
1	217	223	230	237	241	252	260	269	278	288
1,1	298	309	320	332	345	359	374	390	407	425
1,2	444	465	487	510	535	562	590	620	652	686
1,3	722	760	800	850	900	960	1 030	1 110	1 200	1 300
1,4	1 410	1 530	1 660	1 810	1 970	2 140	2 320	2 510	2 710	2 920
1,5	3 140	3 370	3 610	3 870	4 140	4 420	4 710	5 010	5 320	5 640
1,6	5 980	6 330	6 700	7 090	7 500	7 930	8 380	8 850	9 340	9 860
1,7	10 100	11 000	11 600	12 300	13 000	13 700	14 500	15 300	16 200	17 100
1,8	18 100	19 100	20 200	21 400	22 700	24 100	25 600	27 200	29 000	31 100
1,9	33 500	36 300	39 700	43 700	48 300	53 700	59 700	66 200	73 200	80 600
2	88 300	96 100	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000	144 000	151 000	159 000
2,1	167 000	175 000	183 000	191 000	199 000	207 000	215 000	223 000	231 000	239 000
2,2	246 000	254 000	262 000	270 000	278 000	286 000	294 000	302 000	310 000	318 000
2,3	326 000	334 000	342 000	350 000	358 000	365 000	373 000	381 000	389 000	397 000
2,4	405 000	413 000	421 000	429 000	437 000	445 000	–	–	–	–

Таблица Г.3 – Листовая электротехническая сталь марок 1511, 1512, 1513 (высоколегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	96	97	98	99	100	102	104	106	108	111
0,5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144
0,6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187
0,7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247
0,8	254	261	268	275	282	289	296	303	310	317
0,9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404
1	414	424	435	446	4458	470	483	496	510	524
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	685	707
1,2	730	754	780	810	840	870	900	940	980	1 030
1,3	1 080	1 140	1 200	1 270	1 340	1 410	1 490	1 590	1 600	1 720
1,4	1 940	2 060	2 200	2 340	2 500	2 700	2 920	3 140	3 370	3 600
1,5	3 850	4 060	4 290	4 520	4 760	5 000	5 300	5 650	6 000	6 350
1,6	6 700	7 100	7 600	8 100	8 650	9 300	10 000	10 700	11 400	12 200
1,7	13 000	14 000	15 000	16 000	17 000	18 000	19 000	20 000	21 000	22 000
1,8	23 000	24 000	25 000	26 000	27 000	28 000	29 000	30 000	31 200	32 500
1,9	34 000	35 500	37 000	38 500	40 500	42 500	45 000	51 000	57 000	63 000
2	70 000	77 000	84 500	92 000	100 000	108 000	116 000	124 000	138 000	140 000
2,1	148 000	156 000	164 000	172 000	180 000	188 000	196 000	204 000	212 000	220 000
2,2	228 000	236 000	244 000	252 000	260 000	268 000	276 000	284 000	292 000	300 000

Примечание – Для индукции свыше 2,06 Тл кривая намагничивания выражается уравнением

$$B = 1{,}9140 + 1{,}256H \cdot 10^{-6}.$$

Таблица Г.4 – Листовая электротехническая сталь (холоднокатаная) марки 3413

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,6	81	83	85	87	89	91	93	95	97	99
0,7	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128
0,8	130	132	134	136	138	140	142	144	146	149
0,9	152	155	158	161	164	167	170	173	176	179
1	182	185	188	192	195	198	201	204	207	210
1,1	213	216	219	222	225	228	231	234	237	240
1,2	243	246	249	252	255	258	261	264	267	271
1,3	275	279	283	287	291	295	300	305	310	315
1,4	320	326	332	338	344	350	358	366	374	382
1,5	390	402	414	426	438	450	464	478	492	506
1,6	520	544	566	588	610	632	665	698	732	766
1,7	800	840	890	940	990	1 040	1 132	1 224	1 316	1 408
1,8	1 500	1 542	1 700	1 922	2 144	2 366	2 588	2 820	3 080	3 450
1,9	3 825	4 200	4 600	5 200	5 800	7 000	8 200	9 400	10 900	13 400
2	16 000	20 000	25 000	30 000	–	–	–	–	–	–

Таблица Г.5 – Основная кривая намагничивания (сталь 2013)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1 000	1 130	1 240	1 350	1 460	1 580
1,6	1 700	1 860	2 020	2 180	2 340	2 500	2 700	2 800	3 000	3 200
1,7	3 400	3 700	4 000	4 300	4 700	5 000	5 400	5 800	6 200	6 600
1,8	7 000	7 500	8 000	8 500	9 200	10 000	10 600	11 200	11 800	12 400
1,9	13 000	13 600	14 200	14 800	15 600	16 500	17 300	18 100	18 900	19 800
2	20 700	22 600	24 400	26 300	28 100	30 000	36 000	42 000	48 000	54 000
2,1	60 000	67 000	74 000	81 000	88 000	95 000	102 000	109 000	116 000	123 000
2,2	130 000	138 000	146 000	154 000	162 000	170 000	178 000	186 000	194 000	202 000
2,3	210 000	218 000	226 000	234 000	242 000	250 000	258 000	266 000	274 000	282 000
2,4	290 000	298 000	306 000	314 000	322 000	330 000	338 000	246 000	354 000	362 000

Таблица Г.6 – Кривая намагничивания для ярма якоря (сталь 2013)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1 020	1 070	1 110
1,7	1 150	1 220	1 290	1 360	1 430	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900
1,8	2 000	2 160	2 320	2 490	2 650	2 810	2 960	3 110	3 270	3 420
1,9	3 570	3 800	4 030	4 260	4 490	4 720	4 930	5 140	5 350	5 560
2	5 770	6 000	6 300	6 600	7 000	7 400	7 900	8 400	9 000	9 700

Таблица Г.7 – Кривая намагничивания для зубцов якоря (сталь 2013)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1 020	1 050	1 080	1 110
1,7	1 150	1 180	1 220	1 250	1 290	1 330	1 360	1 400	1 440	1 480
1,8	1 520	1 570	1 620	1 670	1 720	1 770	1 830	1 890	1 950	2 010
1,9	2 070	2 160	2 250	2 340	2 430	2 520	2 640	2 760	2 890	3 020
2	3 150	3 320	3 500	3 680	3 860	4 040	4 260	4 480	4 700	4 920
2,1	5 140	5 440	5 740	6 050	6 360	6 670	7 120	7 570	8 020	8 470
2,2	8 920	9 430	9 940	10 460	10 980	11 500	12 000	12 600	13 200	13 800
2,3	14 400	15 100	15 800	16 500	17 200	18 000	18 800	19 600	20 500	21 400

Таблица Г.8 – Основная кривая намагничивания (стали 2212, 2214 и 2312)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,
	H, А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1 000	1 060	1 120	1 180	1 240	1 300	1 360	1 420	1 480	1 540
1,5	1 600	1 750	1 900	2 050	2 200	2 350	2 500	2 700	2 900	3 100
1,6	3 400	3 600	3 800	4 100	4 400	4 700	5 300	5 900	6 500	7 100
1,7	7 700	8 200	8 900	9 400	10 000	10 600	11 100	11 700	12 200	12 800
1,8	13 400	14 000	14 600	15 200	15 800	16 400	17 000	17 600	18 200	18 800
1,9	19 400	20 000	21 800	23 700	25 700	27 800	30 000	32 200	34 400	36 600
2	38 800	41 000	43 200	45 400	47 600	49 800	52 000	54 500	57 500	60 500
2,1	65 500	72 500	80 000	88 000	96 000	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000
2,2	144 000	152 000	160 000	168 000	176 000	184 000	192 000	200 000	208 000	216 000
2,3	224 000	232 000	240 000	248 000	256 000	264 000	272 000	280 000	288 000	296 000
2,4	304 000	312 000	320 000	328 000	336 000	344 000	352 000	360 000	368 000	376 000

Таблица Г.9 – Основная кривая намагничивания (сталь 2412)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	458	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	304	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	399	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1 000	1 070	1 150
1,4	1 230	1 320	1 420	1 520	1 630	1 750	1 870	2 010	2 160	2 320
1,5	2 500	2 680	2 870	3 080	3 300	3 540	3 800	4 090	4 380	4 700
1,6	5 000	5 380	5 760	6 200	6 650	7 120	7 650	8 200	8 800	9 400
1,7	10 000	10 500	11 000	11 500	12 000	12 500	13 100	13 700	14 300	14 900
1,8	15 600	16 200	16 800	17 500	18 300	19 100	20 000	20 900	21 900	22 900
1,9	23 900	25 000	26 200	27 400	28 700	30 000	32 000	36 000	42 000	50 000
2	59 000	68 000	77 000	86 000	95 000	104 000	113 000	122 000	131 000	140 000
2,1	149 000	158 000	167 000	176 000	185 000	194 000	203 000	212 000	221 000	230 000
2,2	239 000	248 000	257 000	266 000	275 000	284 000	293 000	302 000	311 000	320 000
2,3	329 000	333 000	347 000	356 000	365 000	374 000	383 000	392 000	401 000	410 000
2,4	419 000	428 000	437 000	446 000	455 000	464 000	473 000	482 000	491 000	500 000

Приложение Д

(справочное)

Щетки для электродвигателей

Таблица Д.1 – Рекомендуемые расчетные параметры и условия работы щеток для электрических машин общего назначения

Обозначения марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток, В	Плотность тока, А/см^2	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
Г-20 Г-21 Г-22	Угольно-графитные	2,9 4,3 2,5	15 5 10	40 30 30	50 15–100 40	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г3 611М 6110М	Графитные	1,9 2 2	11 12 15	25 40 90	20–25 20–25 12–22	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2А ЭГ2АФ ЭГ4 ЭГ8	Электрографитированные	2,6 2,2 2 2,4	10 15 12 10	45 90 40 40	20–25 15–21 15–20 20–40	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ14 ЭГ51 ЭГ61 ЭГ71 ЭГ74 ЭГ74АФ ЭГ85	“	2,5 2,2 3 2,2 2,7 2,3 2,3	11 12 13 12 15 15 15	40 60 60 40 50 60 50	20–40 20–25 35–50 20–25 17,5–25 15–21 17,5–35	То же

Продолжение таблицы Д.1

Обозначения марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность тока, А/см^2	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
М1 М3 М6 М20	Металлографитные	1,5 1,8 1,5 1,4	15 12 15 12	25 20 25 20	15–20 15–20 15–20 15–20	Низковольтные генераторы и контактные кольца
МГ МГ2 МГ4 МГ64 МГС0 МГС5	“	0,2 0,5 1,1 0,5 0,2 2	20 20 15 25 20 15	20 20 20 25 20 35	18–23 18–23 20–25 15–20 18–23 20–25	То же

Примечания

1 При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и больших частот вращения коллектора (свыше 1500 об/мин) давление на щетку может быть повышено до 50 кПа.

2 Плотность тока щетки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.

3 Коэффициент трения щеток о коллектор μ_m принимается равным 0,25 для всех марок щеток.

Таблица Д.2 – Шкала размеров электрощеток (в миллиметрах), $b_{щ} \times a_{щ} \times h_{щ}$

Тангенци- альный размер $b_{щ}$	Осевой размер $a_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
4	10 12,5 – –	– 12,5 16 –	– – 16 20	– – 16 20	– – – 20	– – – 20	– – – –	– – – –	– – – –	– – – –	– – – –
5	– – – – – –	12,5 16 – – – –	– 16 20 25 – –	– 16 20 25 – –	– – 20 25 32 –	– – 20 25 32 –	– – – 25 32 40	– – – – – –	– – – – – –	– – – – – –	– – – – – –
6,3	– – – –	– – – –	20 25 – –	20 25 32 –	20 25 32 –	– 25 32 –	– 25 32 –	– – 32 40	– – 32 40	– – – –	– – – –
8	– – – – –	– – – – –	– – – – –	20 25 32 – –	– 25 32 – –	– 25 32 – –	– 25 32 – –	– 25 32 40 50	– – 32 40 50	– – – – –	– – – – –
10	– – – –	– – – –	– – – –	– – – –	25 32 – –	25 32 – –	25 32 40 –	– 32 40 50	– 32 40 50	– – 40 50	– – – –
12,5	– – – – –	– – – – –	– – – – –	– – – – –	– – – – –	25 32 – – –	– 32 40 – –	– 32 40 50 –	– 32 40 50 –	– – 40 50 64	– – – 50 64
16	– – – –	– – – –	– – – –	– – – –	– – – –	– – – –	32 40 50 –	32 40 50 –	32 40 50 –	– 40 50 64	– – 50 64
20	– – – –	– – – –	– – – –	– – – –	– – – –	– – – –	– – – –	32 40 50 –	32 40 50 –	– 40 50 64	– – 50 64

Продолжение таблицы Д.2

Тангенци-альный размер $b_{щ}$	Осевой размер $a_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
25	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	40 50 64	40 50 64	– 50 64
32	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	40 50 64	– 50 64 80
40	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– 80 100

Примечание – Щетки шириной 25 мм и выше подразделяются на две.

Приложение Е

(справочное)

Изолирование пазов

Обмотка пазов якорей из круглого провода укладывается, как правило, механизированным способом. Последовательность операций следующая: изолирование пазов; напрессовывание коллектора; намотка обмотки; соединение концов обмотки с коллекторными пластинами; обжатие и пайка обмотки с коллектором; пропитка. В некоторых случаях коллектор напрессовывают до изоляции пазов или после укладки обмотки. Так же могут быть совмещены операции укладки обмотки и соединения ее концов с коллекторными пластинами.

Первой важной операцией является изолирование якоря, от качества которого зависят скорость намотки провода, надежность и долговечность работы машины. Якорь машины работает при высоких частотах вращения, и изоляция подвергается дополнительным механическим воздействиям по сравнению с изоляцией, работающей на неподвижных частях машины.

В якоре обмотка располагается в пазах и касается торца сердечника и части вала около сердечника, поэтому необходимо изолировать пазы *3* (рисунок Е1, торец *2* и участок вала *1*.

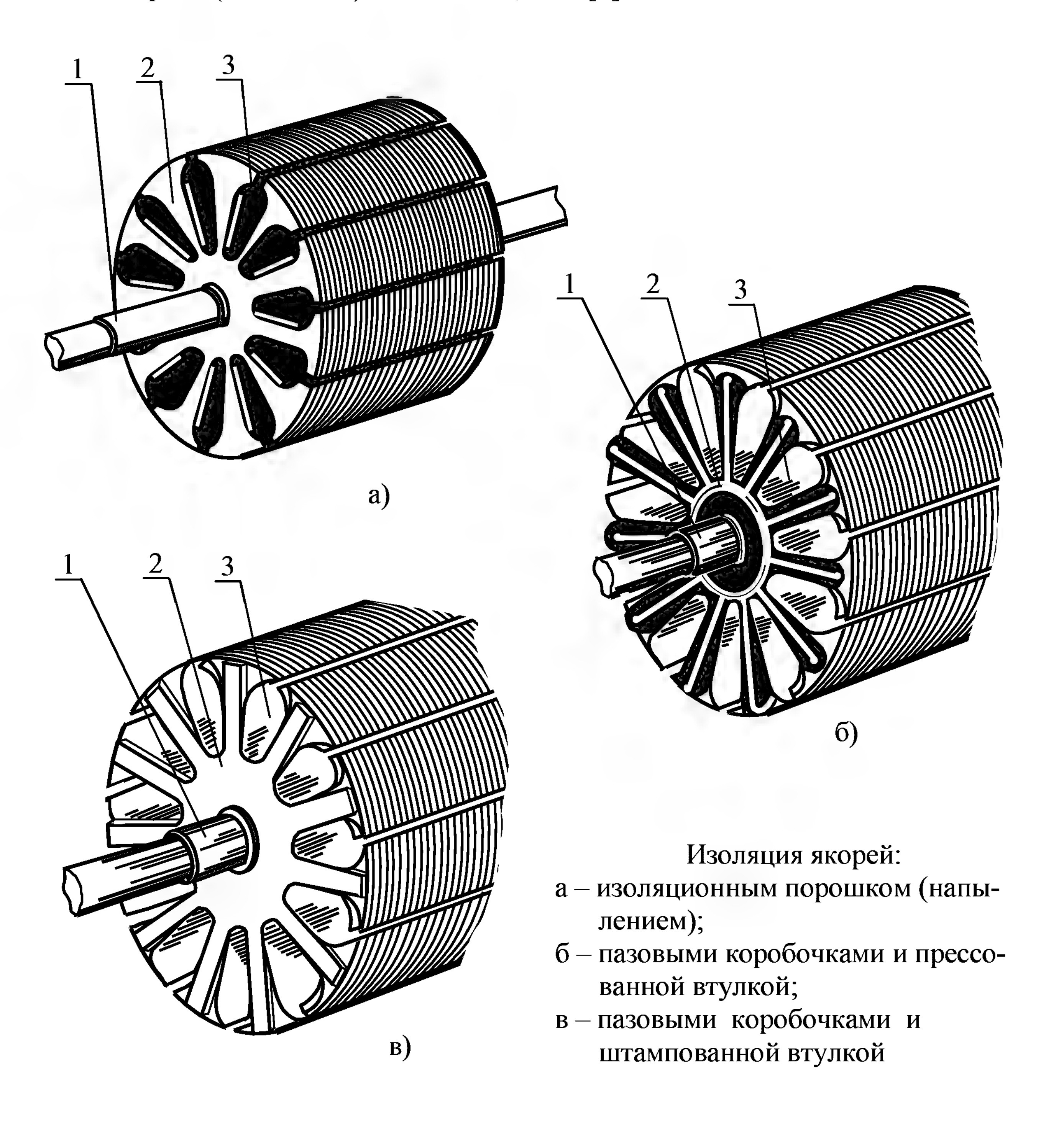
В якорях небольшого диаметра эффективным способом изолирования являются нанесение и последующая запечка изоляционных порошков (рисунок Е1, а). Существует много различных способов нанесения порошков. При изолировании якорей чаще всего используют вихревой способ в псевдоожиженном слое порошка. Толщина изоляции, обеспечивающая нормальную работу якоря, составляет 0,2 – 0,5 мм с допуском 0,05 мм. При таком способе изолирования все части якоря, соприкасающиеся с обмоткой, изолированы непрерывным слоем, что позволяет производить намотку при высоких частотах вращения (изоляция не сдвинется от усилий, возникающих при воздействии провода) и исключает опасность попадания отдельных проводников в промежутки, образуемые изоляцией вала и торца.

Нанесение изоляции способом напыления возможно при высоком качестве сердечника якоря. Листы сердечника должны плотно прилегать друг к другу, быть чистыми, не иметь заусенцев и острых краев. Толщина изоляции 0,15 – 0,25 мм.

В якорях большего диаметра пазы изолируют прокладками из изоляционного материала. Отрезается лист нужного размера, формуется и устанавливается в паз. Изоляция торцов и вала возможна различными способами. В некоторых случаях прессуют из термореактивной пластмассы деталь (см. рисунок Е.1, б) которая изолирует участок вала и торцы. Ее устанавливают на клею на якорь и плотно надевают. После намотки и пропитки обмотки лак надежно скрепит ее с остальными деталями якоря и она будет неподвижна во время работы. В других случаях изоляцию выполняют двумя деталями. Одну деталь, изолирующую торцы *2* (см. рисунок Е.1, в), штампуют из электрокартона тем же штампом, который штампует прямой зубец, надевают на вал и клеем крепят к торцу, а дру-

гую деталь (в виде трубки из электрокартона), изолирующую вал, надевают на него, плотно прижимая к торцу [10].

Корпусная изоляция пазовой части катушек обмотки якоря выполнена пазовым коробом из одного или двух слоев изоляционного материала. Для повышения надежности короба в местах выхода его из паза по торцам якоря он завернут в виде манжеты. Прокладки между слоями обмотки в пазу выполнены из того же материала, что и короб. В лобовых частях секции дополнительно не изолируют. Для класса нагревостойкости "B" применяют изофлекс толщиной 0,35 мм, для класса изоляции "F" - имидофлекс толщиной 0,35 мм или пленкосинтокартон (ПСКА-175) толщиной 0,3 мм [7].



Изоляция якорей:
а – изоляционным порошком (напылением);
б – пазовыми коробочками и прессованной втулкой;
в – пазовыми коробочками и штампованной втулкой

Рисунок Е.1 – Изоляция якорей

Приложение Ж

(справочное)

Характеристики феррит-бариевых и редкоземельных магнитов

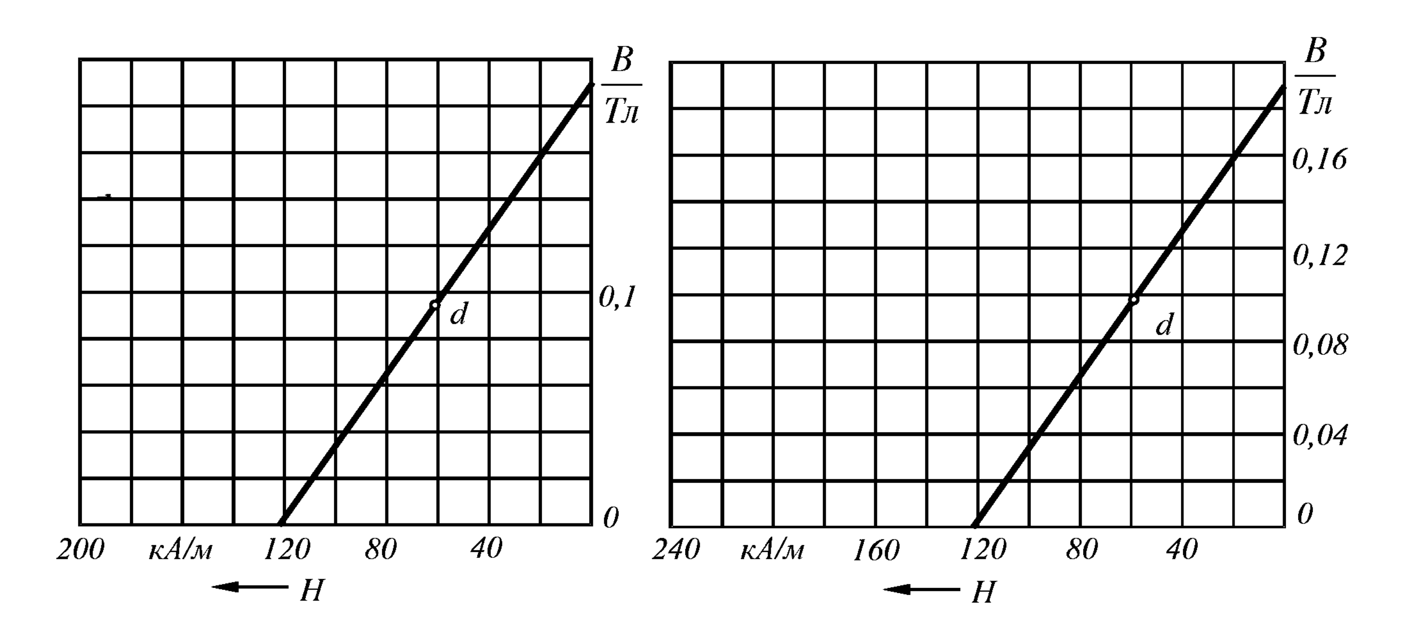


Рисунок Ж.1 – Характеристика размагничивания феррита бария 6БИ240

Рисунок Ж.2 – Характеристика размагничивания феррита бария 6БИ250

Таблица Ж.1 – Параметры магнита марки 6БИ240

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
125	62,5	240	3	0,19	0,095	0,84	1,50	1,50

Таблица Ж.2 – Параметры магнита марки 6БИ250

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
120	59	247	2,8	0,19	0,095	0,78	1,61	1,61

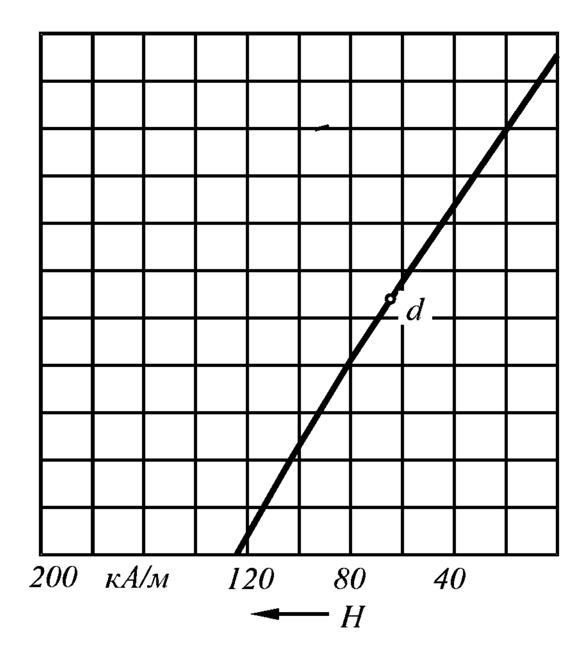


Рисунок Ж.3 – Характеристики размагничивания феррита бария 7БИ215

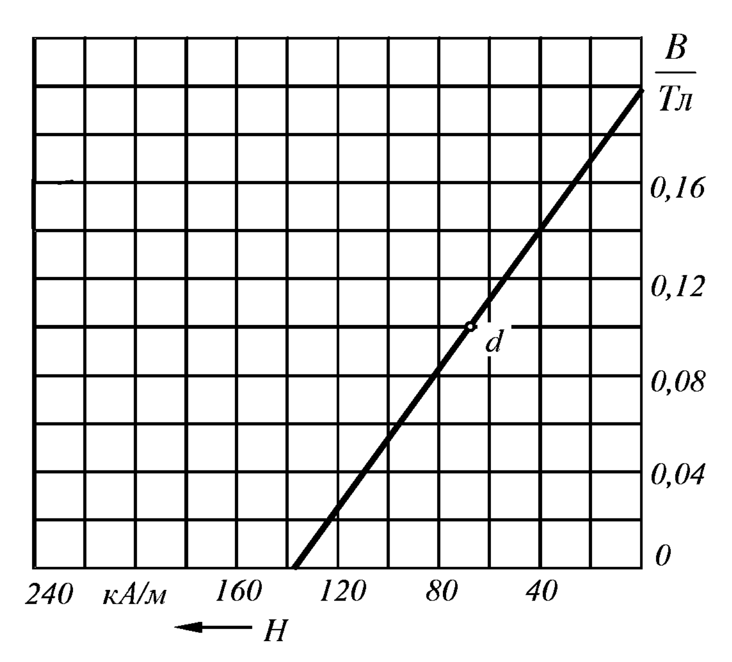


Рисунок Ж.4 – Характеристики размагничивания феррита бария 7БИ300

Таблица Ж.3 – Параметры магнита марки 7БИ215

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
125	66,7	215	3,5	0,21	0,105	0,8	1,58	1,58

Таблица Ж.4 – Параметры магнита марки 7БИ300

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
140	70	300	3,5	0,2	0,1	0,88	1,43	1,43

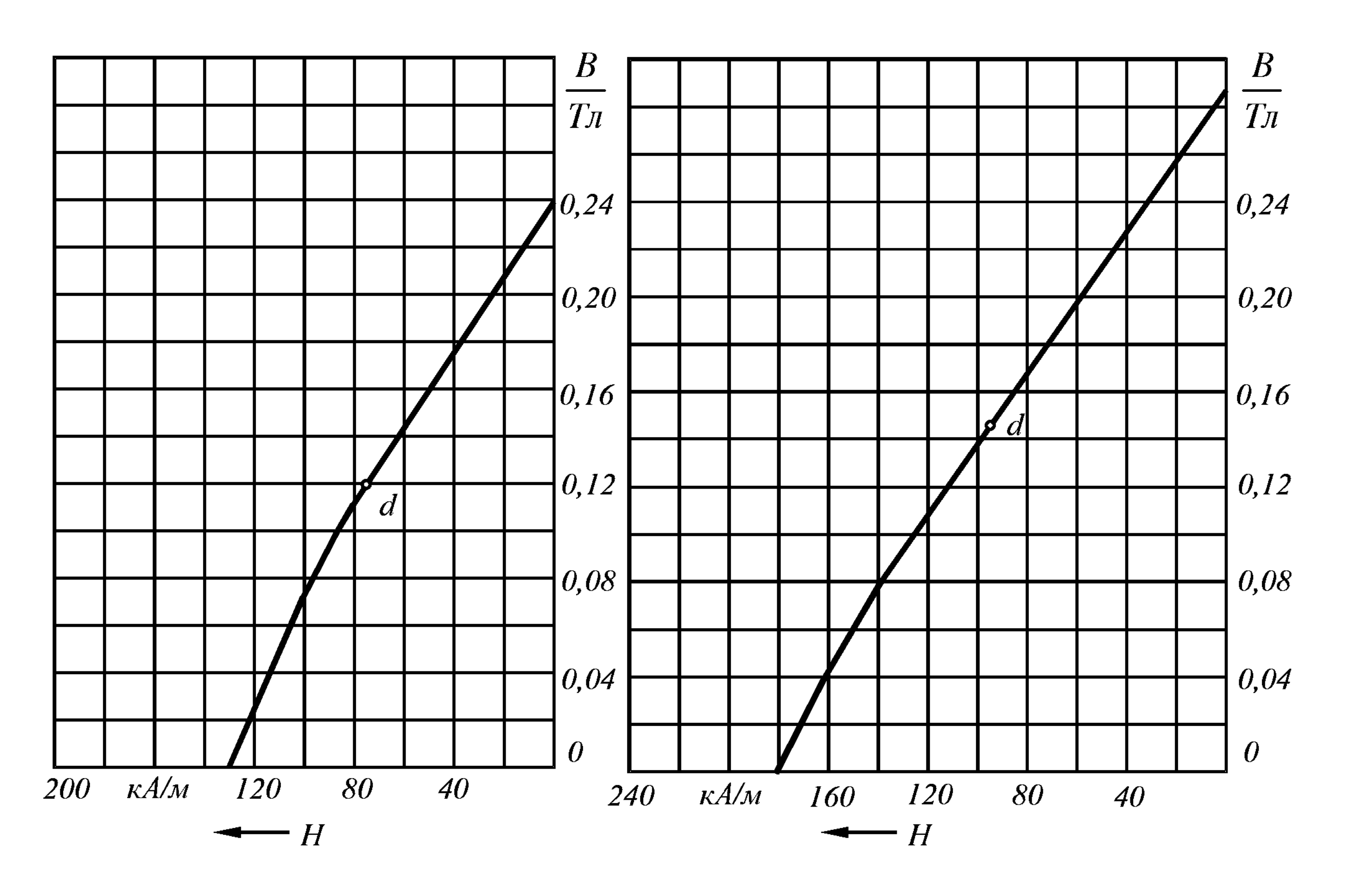


Рисунок Ж.5 – Характеристика размагничивания феррита бария 9БА205

Рисунок Ж.6 – Характеристика размагничивания феррита бария 14БА255

Таблица Ж.5 – Параметры магнита марки 9БА205

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
135	75	205	4,5	0,24	0,12	0,78	1,6	1,6

Таблица Ж.6 – Параметры магнита марки 14БА255

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
185	96,5	255	7	0,29	0,145	0,84	1,5	1,5

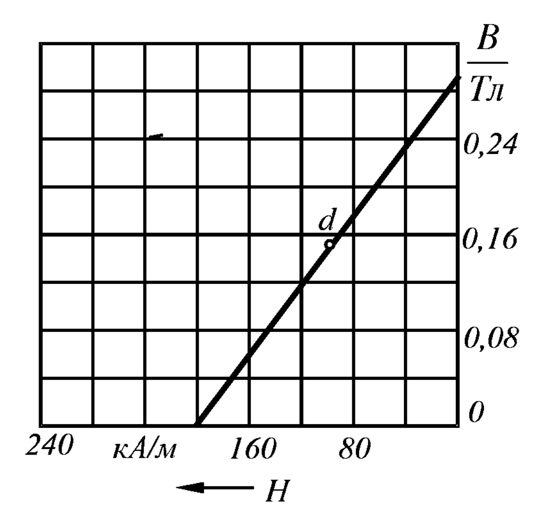


Рисунок Ж.7 – Характеристика размагничивания феррита бария 15БА300

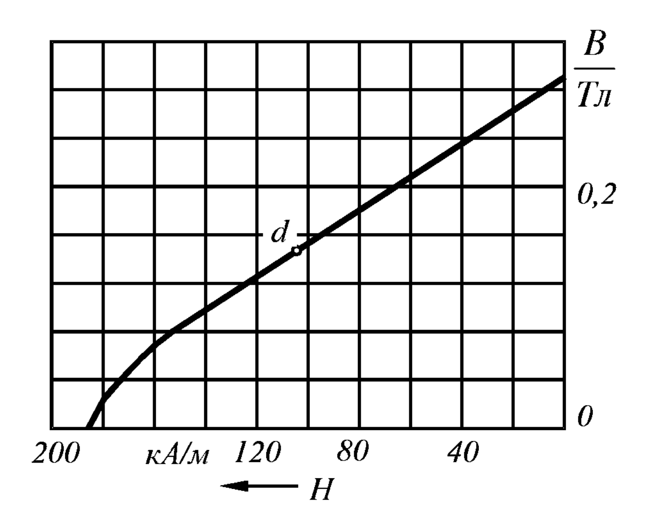


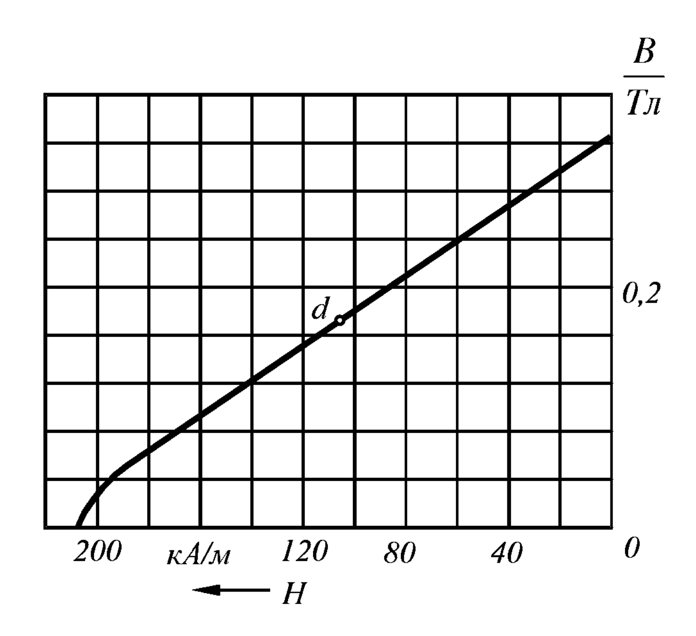
Рисунок Ж.8 – Характеристика размагничивания феррита бария 16БА190

Таблица Ж.7 – Параметры магнита марки 15БА300

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
200	100	300	7,5	0,3	0,15	0,84	1,5	1,5

Таблица Ж.8 – Параметры магнита марки 16БА190

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
185	106,6	190	8	0,30	0,15	0,89	1,41	1,41



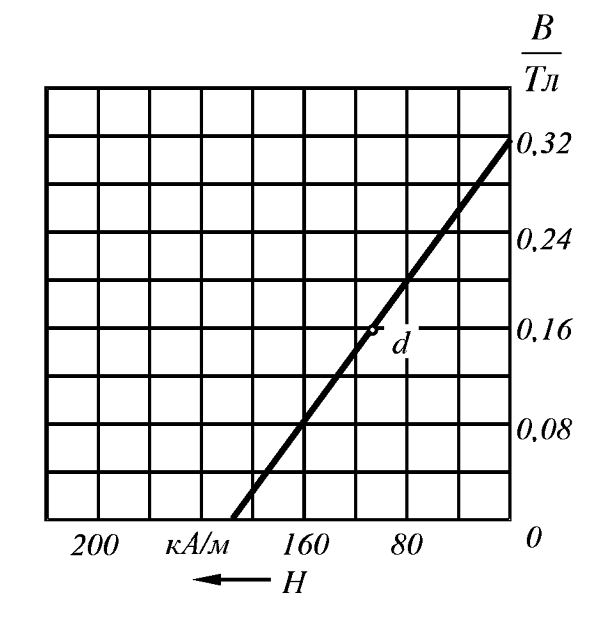


Рисунок Ж.9 – Характеристика размагничивания феррита бария 18БА220

Рисунок Ж.10 – Характеристика размагничивания феррита бария 18БА300

Таблица Ж.9 – Параметры магнита марки 18БА220

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
210	109	220	9	0,33	0,165	0,83	1,51	1,51

Таблица Ж.10 – Параметры магнита марки 18БА300

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
220	110	300	9	0,32	0,16	0,87	1,45	1,45

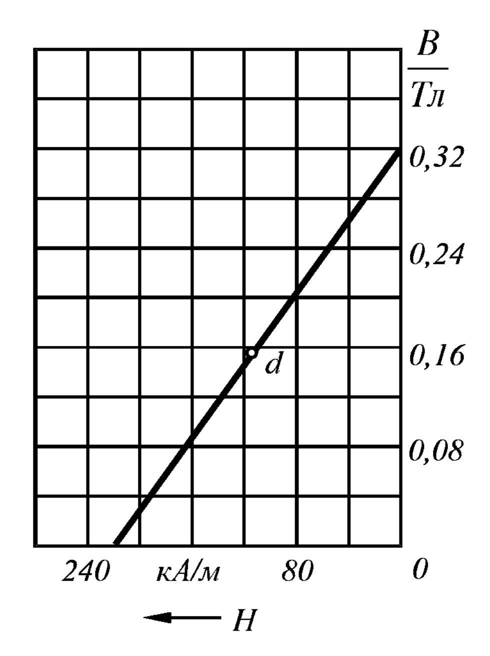


Рисунок Ж.11 – Характеристика размагничивания феррита бария 19БА260

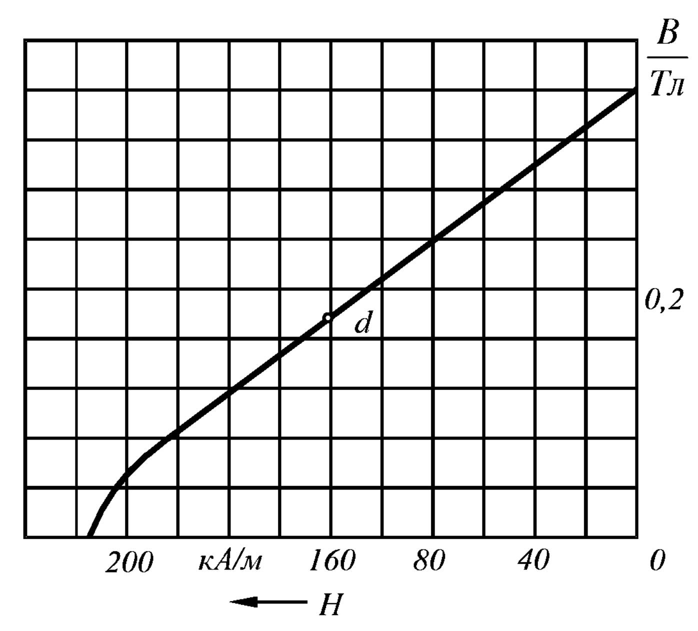


Рисунок Ж.12 – Характеристика размагничивания феррита бария 22БА220

Таблица Ж.11 – Параметры магнита марки 19БА260

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
225	115	260	9,5	0,33	0,165	0,87	1,43	1,43

Таблица Ж.12 – Параметры магнита марки 22БА220

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
215	122	220	11	0,36	0,18	0,85	1,48	1,48

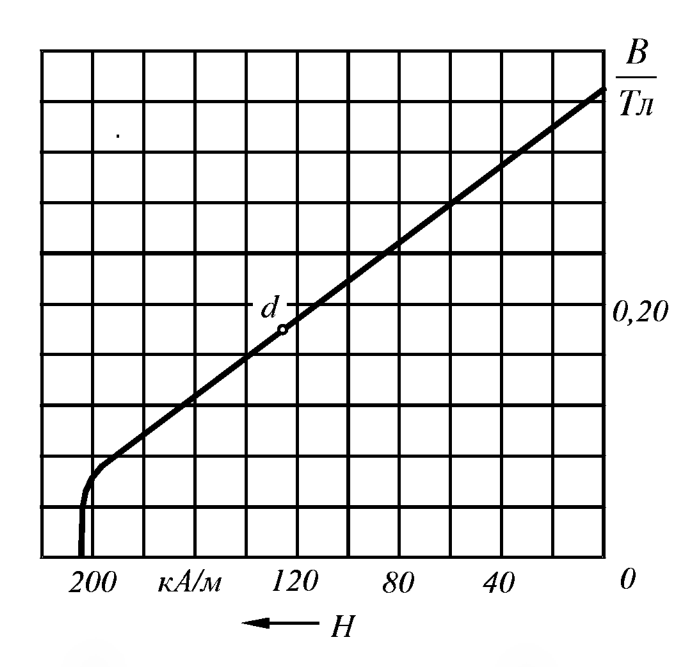


Рисунок Ж.13 – Характеристика размагничивания феррита бария 24БА210

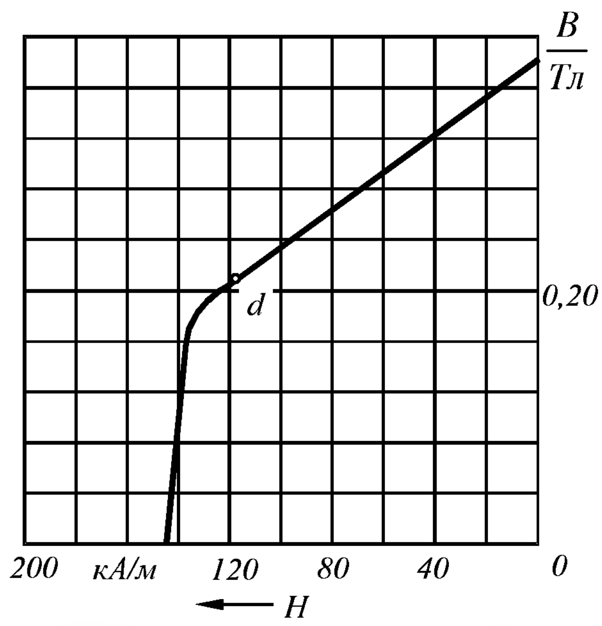


Рисунок Ж.14 – Характеристика размагничивания феррита бария 25БА150

Таблица Ж.13 – Параметры магнита марки 24БА210

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
205	130	210	12	0,37	0,185	0,88	1,42	1,42

Таблица Ж.14 – Параметры магнита марки 25БА150

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
145	132	150	12,5	0,38	0,19	0,87	1,44	1,44

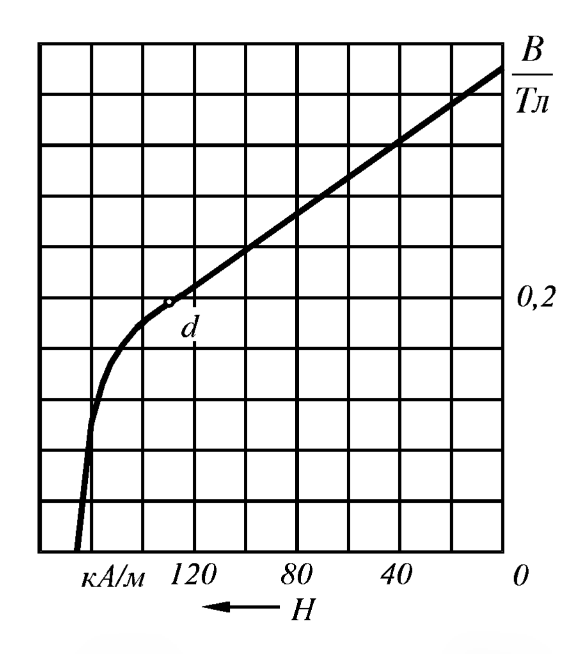


Рисунок Ж.15 – Характеристика размагничивания феррита бария 25БА170

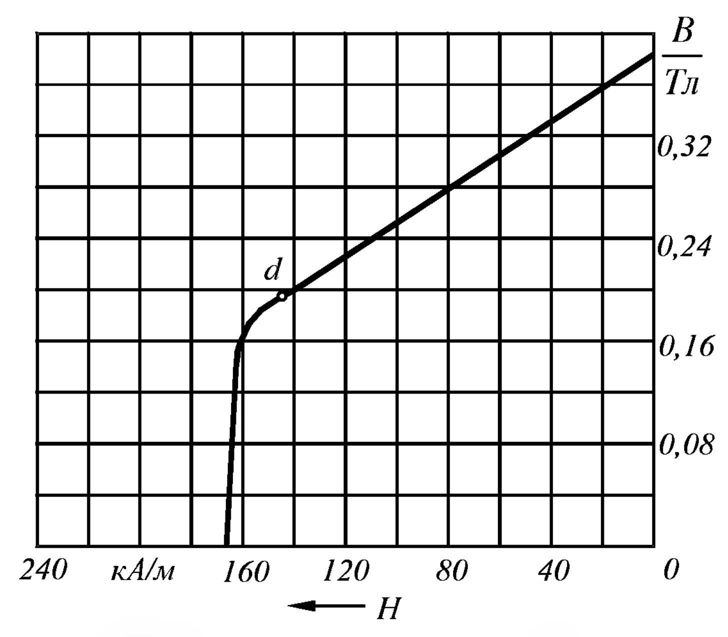


Рисунок Ж.16 – Характеристика размагничивания феррита бария 28БА170

Таблица Ж.15 – Параметры магнита марки 25БА170

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
165	132	170	12,5	0,38	0,19	0,87	1,44	1,44

Таблица Ж.16 – Параметры магнита марки 28БА170

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
165	144	170	14	0,39	0,195	0,93	1,35	1,39

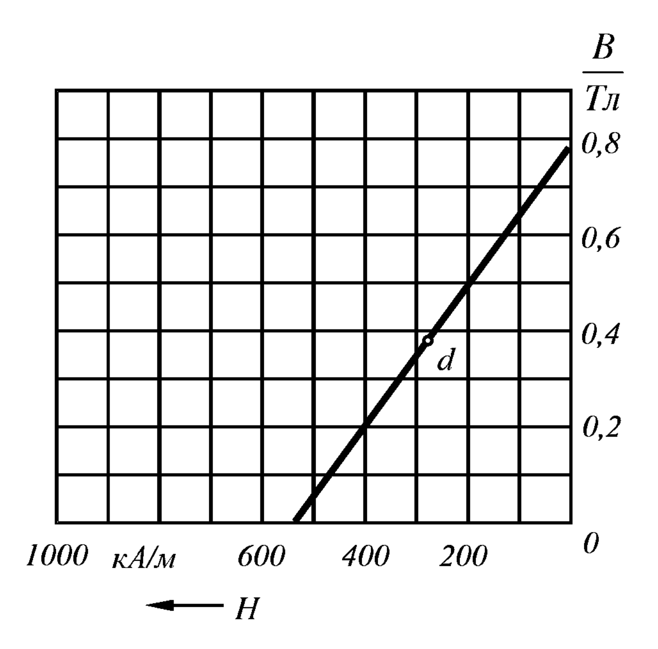


Рисунок Ж.17 – Характеристика размагничивания редкоземельного материала КС37

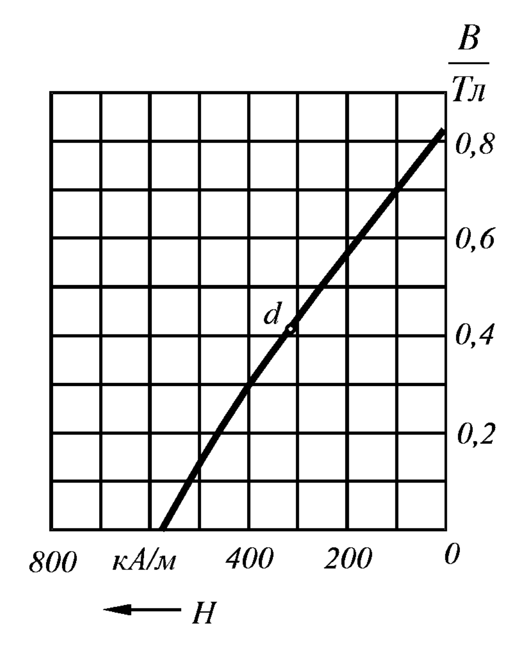


Рисунок Ж.18 – Характеристика размагничивания редкоземельного материала КС37А

Таблица Ж.17 – Параметры магнита марки КС37

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
540	286	1300	55	0,77	0,385	0,90	1,35	1,35

Таблица Ж.18 – Параметры магнита марки КС37А

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
560	315	1000	65	0,82	0,41	0,98	1,30	1,30

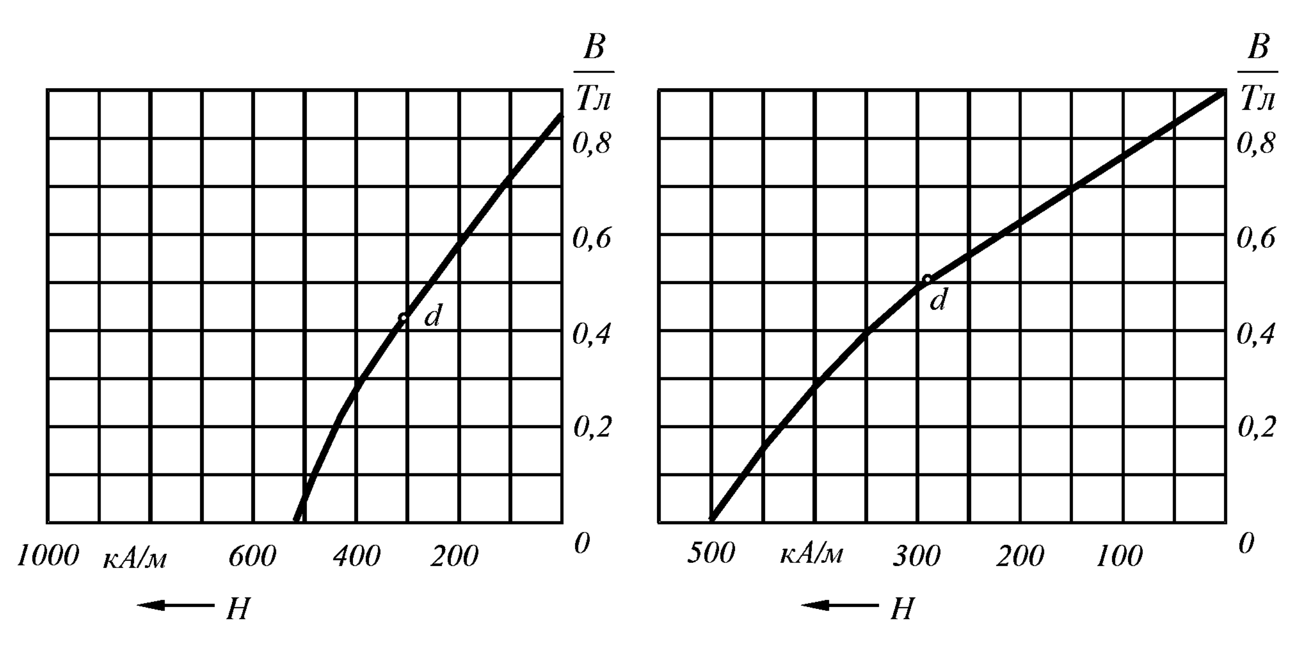


Рисунок Ж.19 – Характеристика размагничивания редкоземельного материала КСП37

Рисунок Ж.20 – Характеристика размагничивания редкоземельного материала КСП37А

Таблица Ж.17 – Параметры магнита марки КСП37

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
520	306	800	65	0,85	0,425	0,90	1,39	1,39

Таблица Ж.18 – Параметры магнита марки КСП37А

H_{cB}	H_d	H_{cM}	W	B_r	B_d	$\Theta_л$	$K_в$	$(B/H)_d$
кА/м	кА/м	кА/м	кДж/м^3	Тл	Тл	-	мкГн/м	мкГн/м
500	290	640	72,5	0,9	0,5	0,90	1,38	1,72

Приложение И

(справочное)

Удельные потери в листовой электротехнической стали при B = 1 Тл и f = 50 Гц

Таблица И.1

Марка стали	1211		1212		1311	1411		1412		1413	
Толщина, мм	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,35	0,5	0,35	0,5	0,35
$p_{1,\,0/50}$, Вт/кг	5,8	3,3	5,4	3,1	2,5	2	1,6	1,8	1,4	1,55	1,35

Таблица И.2

Марка стали	1511		1512		1513		3413		2011	
Толщина, мм	0,5	0,35	0,5	0,35	0,5	0,35	0,5	0,35	0,65	0,5
$p_{1,\,0/50}$, Вт/кг	1,55	1,35	1,4	1,2	1,25	1,05	0,8	0,6	3,8	3,5

Таблица И.3

Марка стали	2012		2013		2212		2214	2312		2412	
Толщина, мм	0,65	0,5	0,65	0,5	0,65	0,5	0,5	0,65	0,5	0,5	0,35
$p_{1,\,0/50}$, Вт/кг	3,6	2,9	3,1	2,5	2,6	2,2	2	2,4	1,75	1,3	1,15

Приложение К

(справочное)

На рисунках К1 и К2 приведены продольный и поперечный разрезы основного вида двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, имеющего 2р = 4, z = 15, волновую двухслойную обмотку, уложенную в овальные полузакрытые пазы. Якорь выполнен без скоса пазов.

Двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов имеет закрытое исполнение (IP44). Статор электродвигателя состоит из алюминиевого корпуса *1*, цилиндрического магнитомягкого ярма *2*, по внутренней поверхности которого расположены дугообразные магниты *3* с радиальной намагниченностью. Постоянные магниты крепят к ярму с помощью клея или пружинных скоб *4*.

Якорь *5* двигателя постоянного тока состоит из сердечника, обмотки, коллектора *6* и вала *7*. Сердечник якоря представляет собой цилиндр, набранный из штампованных изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм или 0,5 мм. В полузакрытые пазы сердечника ротора укладывают активные стороны секций (катушек) обмотки якоря. Секции выполняют из медного изолированного провода, а их концы припаивают к пластинам коллектора. Обмотку якоря укрепляют в пазах гетинаксовыми клиньями, а на лобовые части накладывают бандажи из стеклоленты или шнура.

К корпусу винтами *8* (шпильками, болтами) прикреплены выполненные из алюминиевого сплава (Ал2, А9) подшипниковые щиты *9* (крышки). Эти щиты заливают на стальные втулки, в которых размещают шарикоподшипники *10*. Щеткодержатель *11* закреплен на подшипниковом щите. Щетки устанавливают так, чтобы они замыкали секции, активные стороны которых находятся между полюсами (на геометрической нейтрали).

Напряжение питающей сети подводится к вводным клеммам *12*.

На общем виде двигателя постоянного тока (рисунок К.1, рисунок К.2) указывают габаритные размеры (*B, G*) и установочно-присоединительные размеры (*D, C, E, F*), в спецификации указываются основные сборочные узлы, детали и стандартные изделия.

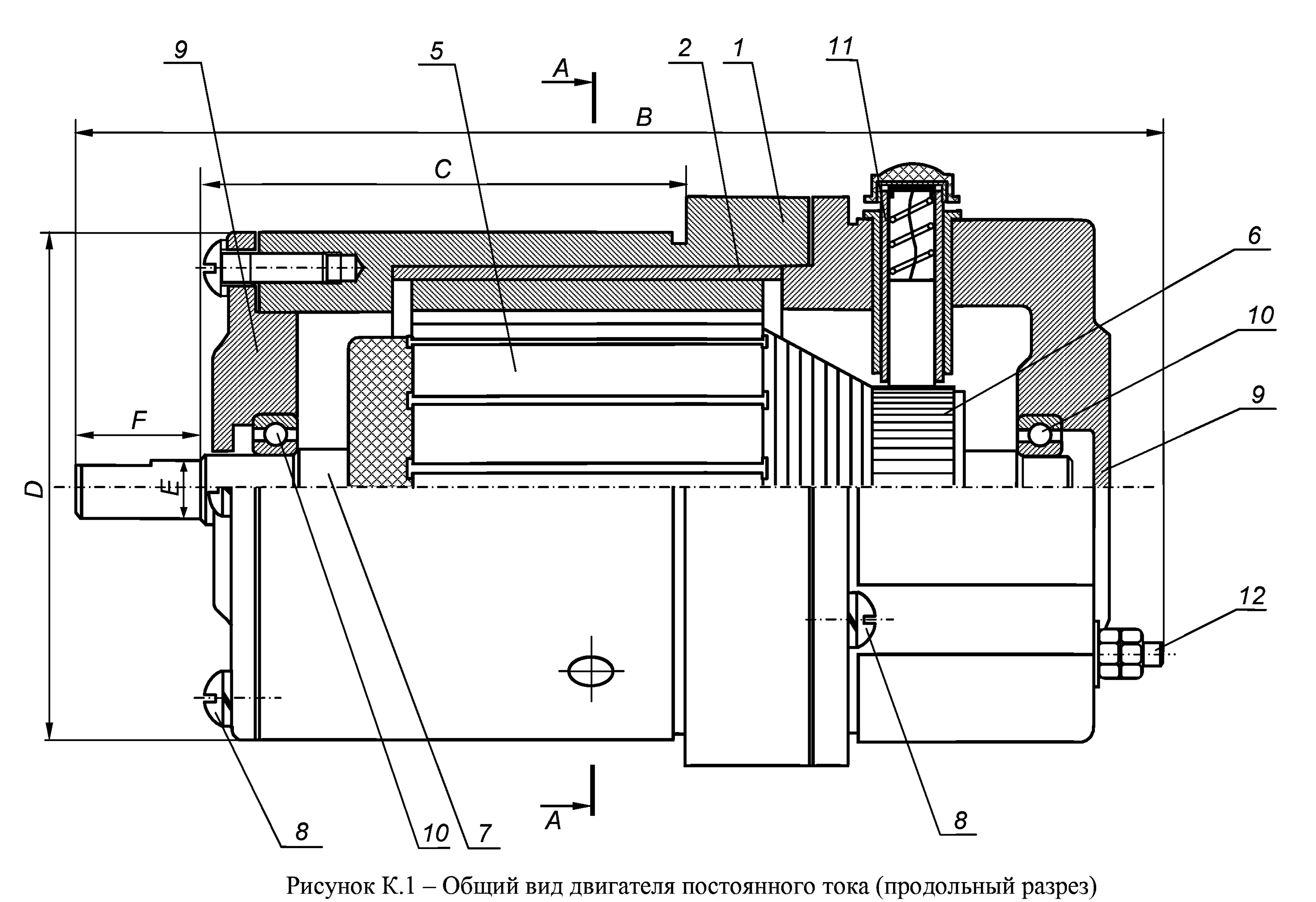


Рисунок К.1 – Общий вид двигателя постоянного тока (продольный разрез)

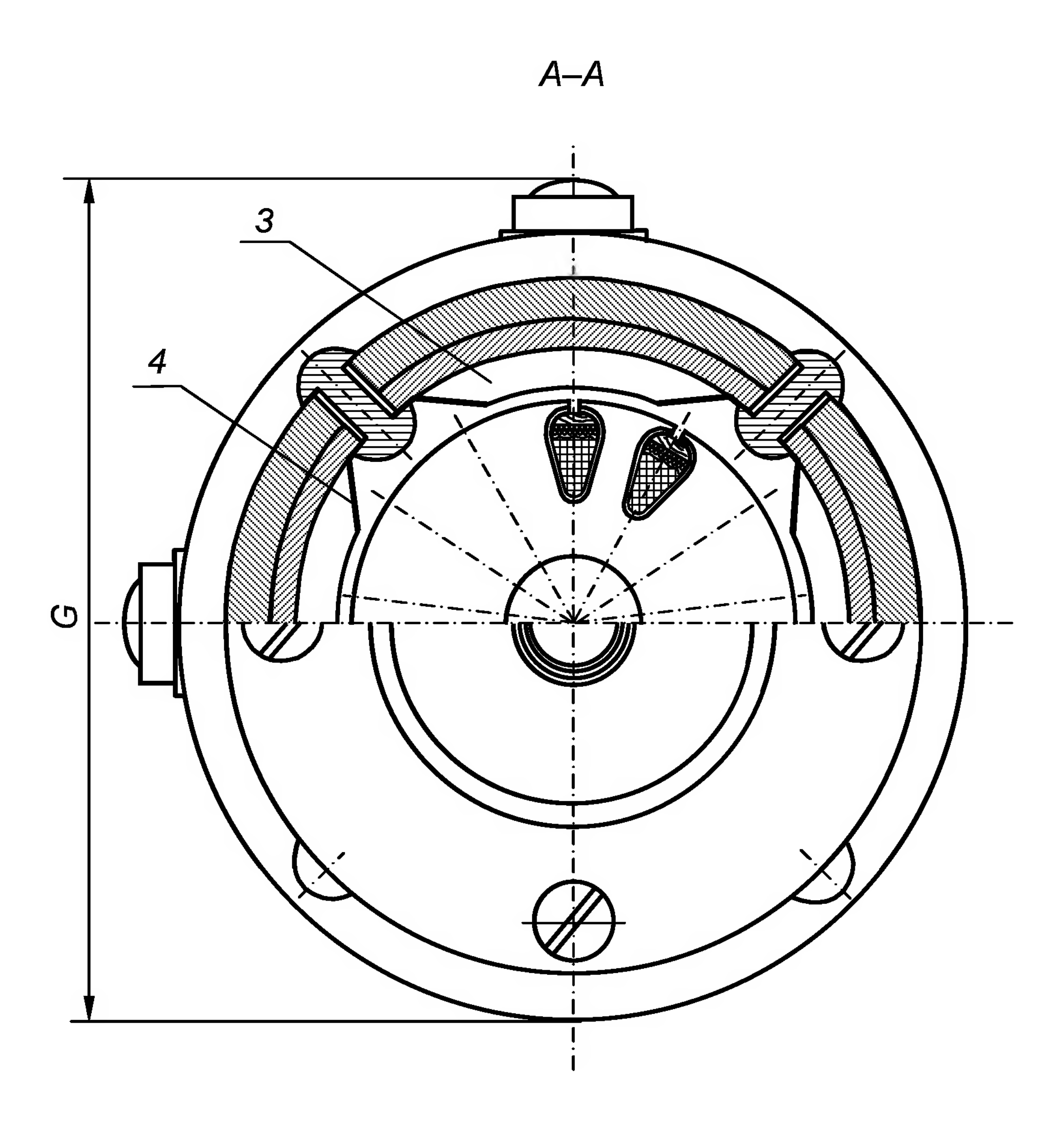


Рисунок К.2 – Общий вид двигателя постоянного тока (поперечный разрез)